

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE PSICOLOGÍA

**Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento Psicológico
II (Psicología Diferencial y del Trabajo)**



**USO DE TÉRMINOS DE COLOR BÁSICOS EN
DALTÓNICOS DICRÓMATAS Y PERSONAS DE
EDAD AVANZADA.**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Humberto Moreira Villegas

Bajo la dirección del doctor

Julio Lillo Jover

Madrid, 2011

ISBN: 978-84-694-0084-5

© Humberto Moreira Villegas, 2010

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Facultad de Psicología

Departamento de Personalidad, Evaluación y Tratamiento
Psicológico II (Psicología Diferencial y del Trabajo)

TESIS DOCTORAL



Uso de Términos de Color Básicos en Daltónicos Dicrómatas y Personas de Edad Avanzada

Autor:

Humberto Moreira Villegas

Director:

Julio Lillo Jover

Catedrático de Psicología

Madrid, 2010

Índice

Agradecimientos.....	1
1. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas y personas de edad avanzada: Parte Teórica.....	3
1.1. <i>Capítulo 1: Articulación de la presente tesis con líneas de investigación previas y futuras.....</i>	5
1.2. <i>Capítulo 2: Fotometría y colorimetría: nociones básicas.....</i>	9
1.2.1. Radiometría y fotometría.....	9
1.2.2. Función oficial de eficiencia espectral.....	15
1.2.3. Tricromaticidad y funciones de igualación del color.....	17
1.2.4. Cambio de un sistema de primarios a otro.....	18
1.2.5. Sistema internacional de medición del color.....	20
1.2.6. Fundamentales de los conos.....	25
1.2.7. Filtrado prerretiniano y su influencia sobre la determinación de funciones psicofísicas.....	25
1.2.8. Colorimetría vs. Percepción del color.....	29
1.3. <i>Capítulo 3: Alteraciones de la visión del color.....</i>	31
1.3.1. Alteraciones heredadas de la visión del color.....	32
1.3.1.1. Clasificación funcional.....	32
1.3.1.2. Relación con los fotopigmentos de los conos.....	43
1.3.1.3. Diagramas de cromaticidad y líneas de confusión.....	58
1.3.1.4. ¿Qué “ve” un dicrómata?: simulación de la apariencia del color.....	63
1.3.2. Alteraciones adquiridas de la visión del color.....	67
1.3.2.1. Clasificación funcional.....	68
1.3.2.2. Alteraciones de la visión del color asociadas al envejecimiento.....	70
1.3.3. Consecuencias laborales de las alteraciones de la visión del color.....	97

1.4. Capítulo 4: Categorías de color básicas.....	101
1.4.1. Denominación del color en tricrómatas normales.....	101
1.4.1.1. Estudios sobre denominación del color con estímulos monocromáticos.....	103
1.4.1.2. Estudios sobre denominación del color con estímulos de superficie: CCB.....	111
1.4.2. Denominación del color en observadores con alteraciones en la visión del color.....	125
1.4.2.1. Denominación del color en observadores daltónicos.....	125
1.4.2.2. Denominación del color en observadores envejecidos..	150
2. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas y personas de edad avanzada: Parte Empírica.....	153
2.1. Capítulo 5: Introducción a los estudios empíricos.....	155
2.2. Capítulo 6: Estudio 1. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas.....	167
Método.....	180
Participantes.....	180
Materiales, estímulos e instrumentos.....	181
Procedimiento.....	185
Resultados: Tarea de mapa de colores.....	187
I. Conexiones entre categorías.....	188
II. Frecuencia y distribución de los errores.....	208
III. Análisis colorimétrico de los errores.....	230
Resultados: Tarea de búsqueda de mejores ejemplares.....	265
Discusión: Tarea de mapa de colores.....	277
Discusión: Tarea de búsqueda de mejores ejemplares.....	298
Discusión general.....	303
2.3. Capítulo 7: Estudio 2. Uso de términos de color básicos en personas de edad avanzada.....	319
Método.....	319
Participantes.....	319
Materiales, estímulos e instrumentos.....	320
Procedimiento.....	320

Resultados: Tarea de mapa de colores.....	320
I. Conexiones entre categorías.....	321
II. Frecuencia y distribución de los errores.....	332
III. Análisis colorimétrico de los errores.....	344
Resultados: Tarea de búsqueda de mejores ejemplares.....	357
Discusión.....	366
2.4. Capítulo 8: Conclusiones.....	373
2.5. Capítulo 9: Limitaciones de la presente investigación y perspectivas futuras.....	381
Referencias Bibliográficas.....	385
Anexo I: Procedimiento para analizar los errores cometidos en la tarea de mapa de colores. Resumen de los resultados derivados de aplicar el criterio laxo.....	399
Anexo II: Procedimiento para calcular el índice de solapamiento.....	411

Relación de Tablas

	Página
1. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas y personas de edad avanzada: Parte Teórica.....	
1.1. <i>Capítulo 1: Articulación de la presente investigación con líneas de investigación previas y futuras.....</i>	
1.2. <i>Capítulo 2: Fotometría y colorimetría: nociones básicas.....</i>	
▪ Tabla 2.1: Principales unidades radiométricas.....	11
▪ Tabla 2.2: Correspondencia entre medidas radiométricas y fotométricas	12
1.3. <i>Capítulo 3: Alteraciones de la visión del color.....</i>	
▪ Tabla 3.1: Nomenclatura de los diferentes tipos de alteraciones heredadas de la visión del color.....	33
▪ Tabla 3.2: Principales características de las deficiencias heredadas de la visión del color.....	37
▪ Tabla 3.3: Porcentaje de prevalencia de las deficiencias heredadas de la visión del color.....	40
▪ Tabla 3.4: Distribución de las deficiencias heredadas de la visión del color en el género humano.....	41
▪ Tabla 3.5: Tipos de Monocromatismos.....	42
▪ Tabla 3.6: Diferencias entre los genes que codifican las opsinas de los fotopigmentos humanos L y M.....	51
▪ Tabla 3.7: Máximos de las curvas de absorción de los fotopigmentos humanos M, híbridos M-L, y L.....	52
▪ Tabla 3.8: Coordenadas cromáticas de los puntos de convergencia de observadores dicrómatas.....	60
▪ Tabla 3.9: Comparación entre las principales características de las deficiencias heredadas y adquiridas de la visión del color.....	67
▪ Tabla 3.10: Tipos de alteraciones adquiridas de la visión del color.....	69
▪ Tabla 3.11: Resumen de los trabajos científicos comentados sobre envejecimiento y visión del color.....	73
▪ Tabla 3.12: Profesiones en las que se requiere una visión normal del color.....	98

1.4. Capítulo 4: Categorías de color básicas.....	101
▪ Tabla 4.1: Trabajos en los que se ha estudiado la denominación del color de estímulos monocromáticos en observadores tricrómatas normales.....	104
▪ Tabla 4.2: Características esenciales de los modelos teóricos, previos al WCS, sobre la naturaleza y la línea evolutiva de los sistemas de categorización del color.....	114
▪ Tabla 4.3: Tareas más empleadas para identificar y localizar las CCB de una lengua.....	115
▪ Tabla 4.4: Comparación entre los métodos empleados en Berlin y Kay (1969) y el WCS.....	115
▪ Tabla 4.5: Características esenciales del modelo teórico sobre la naturaleza y la línea evolutiva de los sistemas de categorización del color propuesto por Kay, Berlin y Merrifield (1991).....	116
▪ Tabla 4.6: Características esenciales de los modelos teóricos, afinados a partir de los resultados del WCS, sobre la naturaleza y la línea evolutiva de los sistemas de categorización del color.....	117
▪ Tabla 4.7: Algunas investigaciones realizadas desde la psicología experimental para el establecimiento de las CCB del inglés y del chino.....	120
▪ Tabla 4.8: Trabajos en los que se ha estudiado la denominación del color de estímulos monocromáticos en observadores daltónicos.....	126
▪ Tabla 4.9: Trabajos en los que se ha estudiado la denominación de color de estímulos de superficie en observadores daltónicos.....	136
2.1. Capítulo 5: Introducción a los estudios empíricos.....	
▪ Tabla 5.1. Características relevantes que afectan a la validez y utilidad de los datos obtenidos en diferentes investigaciones sobre CCB en daltónicos dicrómatas.....	162
2.2. Capítulo 6: Estudio 1. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas.....	
▪ Tabla 6.1. Observadores que tomaron parte en el Estudio 1.....	180
▪ Tabla 6.2.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores tricrómatas normales, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	191
▪ Tabla 6.2.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores protanopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	191

▪ Tabla 6.2.3. Conexiones existentes entre CCB en observadores deuteranopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	191
▪ Tabla 6.3.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores tricrómatas normales, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B a los resultados de la tarea de mapa de colores.	192
▪ Tabla 6.3.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores protanopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	192
▪ Tabla 6.3.3. Conexiones existentes entre CCB en observadores deuteranopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	192
▪ Tabla 6.4.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores tricrómatas normales, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C a los resultados de la tarea de mapa de colores.	193
▪ Tabla 6.4.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores protanopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	193
▪ Tabla 6.4.3. Conexiones existentes entre CCB en observadores deuteranopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	193
▪ Tabla 6.5.1. Conexiones entre CCB existentes en observadores protanopes que no se dieron en tricrómatas normales.....	194
▪ Tabla 6.5.2. Conexiones entre CCB existentes en observadores deuteranopes que no se dieron en tricrómatas normales.....	194
▪ Tabla 6.6. Stress bruto normalizado obtenido en las soluciones de diferentes análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.2.1-6.2.3 (Estrategia A), 6.3.1-6.3.3 (Estrategia B) y 6.4.1-6.4.3 (Estrategia C).....	195
▪ Tabla 6.7.1. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales de los análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.2.1-6.2.3 (Estrategia A).....	196
▪ Tabla 6.7.2. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales de los análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.3.1-6.3.3 (Estrategia B).....	196

▪ Tabla 6.7.3. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales de los análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.4.1.-6.4.3 (Estrategia C).....	196
▪ Tabla 6.8.1. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de tricrómatas normales.....	202
▪ Tabla 6.8.2. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de protanopes.....	202
▪ Tabla 6.8.3. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de deuteranopes.....	202
▪ Tabla 6.8.4. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de tricrómatas normales.....	202
▪ Tabla 6.9. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en la solución tridimensional del análisis MDS no métrico aplicado a la matriz grupal de tricrómatas normales mostrada en la Tabla 6.2.1 (Estrategia A).....	203
▪ Tabla 6.10. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensional y tridimensional de los análisis MDS realizados a partir de la matriz grupal de tricrómatas normales (Estrategia A).....	204
▪ Tabla 6.11. Correlaciones entre las dimensiones de los modelos 3D en tricrómatas normales.....	204
▪ Tabla 6.12. Correlaciones entre las dimensiones del modelo 3D en TN y 2D en protanopes y deuteranopes.....	207
▪ Tabla 6.13.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	209
▪ Tabla 6.13.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores deuteranopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	209
▪ Tabla 6.14. Errores más comunes tanto en protanopes como en deuteranopes, y diferencias en los errores cometidos por ambos grupos.....	212

▪ Tabla 6.15.1. Número de observadores protanopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores.....	214
▪ Tabla 6.15.2. Número de observadores deuteranopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores.....	214
▪ Tabla 6.16.1. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de protanopes.....	215
▪ Tabla 6.16.2. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de deuteranopes.....	215
▪ Tabla 6.17. Asimetrías más destacables detectadas en las Tablas 6.13.1-6.13.2.....	216
▪ Tabla 6.18. Solapamiento entre los mapas de color de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes, establecidos a nivel grupal.....	217
▪ Tabla 6.19. Diferentes medidas de la ejecución de protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores.....	218
▪ Tabla 6.20.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JMI (P6) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	219
▪ Tabla 6.20.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JJMC (P7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	219
▪ Tabla 6.21.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope AEM (D4) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	220
▪ Tabla 6.21.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope JD (D7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	220
▪ Tabla 6.22. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de aciertos y errores cometidos por protanopes en la tarea de mapa de colores.....	237
▪ Tabla 6.23. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de aciertos y errores cometidos por deuteranopes en la tarea de mapa de colores.....	237

▪ Tabla 6.24. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de errores cometidos y errores esperados en protanopes en la tarea de mapa de colores.....	241
▪ Tabla 6.25. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de errores cometidos y errores esperados en deuteranopes en la tarea de mapa de colores.....	241
▪ Tabla 6.26.1. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB a partir del Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada.....	246
▪ Tabla 6.26.2. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en deuteranopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB a partir del Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada.....	246
▪ Tabla 6.27.1. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por tricrómatas normales y protanopes, y centroides computados para protanopes a partir de las predicciones del Modelo A.....	250
▪ Tabla 6.27.2. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por tricrómatas normales y deuteranopes, y centroides computados para deuteranopes a partir de las predicciones del Modelo A.....	250
▪ Tabla 6.28. Valor estimado del parámetro $-b$ de la función exponencial ajustada para modelar la relación entre la probabilidad de error y ΔRG_{res}	253
▪ Tabla 6.29.1. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB, a partir del Modelo B de predicción de errores basado en líneas de confusión, claridad transformada, y discriminación rojo-verde residual.....	255
▪ Tabla 6.29.2. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en deuteranopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB, a partir del Modelo B de predicción de errores basado en líneas de confusión, claridad transformada, y discriminación rojo-verde residual.....	255
▪ Tabla 6.30.1. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por protanopes, y centroides computados para este grupo de observadores a partir de las predicciones de los Modelos A y B.....	259

▪ Tabla 6.30.2. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por deuteranopes, y centroides computados para este grupo de observadores a partir de las predicciones de los Modelos A y B.....	259
▪ Tabla 6.30.3. Distancias existentes entre los centroides empíricos y los predichos a partir de los Modelos A y B en protanopes y deuteranopes.....	259
▪ Tabla 6.31. Comparación del ajuste entre de las predicciones derivadas de los Modelos A y B y los resultados obtenidos en la tarea de mapa de colores.....	260
▪ Tabla 6.32.1. Resultados de los análisis efectuados en protanopes para comparar las coordenadas colorimétricas teóricas de las distintas categorías, computadas a partir de los Modelos A y B, con las obtenidas empíricamente en la tarea de mapa de colores (en el espacio CIELUV).....	261
▪ Tabla 6.32.2. Resultados de los análisis efectuados en deuteranopes para comparar las coordenadas colorimétricas teóricas de las distintas categorías, computadas a partir de los Modelos A y B, con las obtenidas empíricamente en la tarea de mapa de colores (en el espacio CIELUV)	262
▪ Tabla 6.33. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la distribución empírica del porcentaje de aciertos y errores de cada CCB, y las distribuciones derivada de las predicciones de los Modelos A y B.....	263
▪ Tabla 6.34. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la matriz de confusión empírica de cada observador, y las matrices de confusión derivadas de las predicciones de los Modelos A y B.....	264
▪ Tabla 6.35.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.....	266
▪ Tabla 6.35.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores deuteranopes en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.....	266
▪ Tabla 6.36.1. Errores cometidos en la tarea de búsqueda de foci por el grupo de observadores protanopes.....	273
▪ Tabla 6.36.2. Errores cometidos en la tarea de búsqueda de foci por el grupo de observadores deuteranopes.....	274
▪ Tabla 6.37. Comparación resumida de los aspectos fundamentales de tres modelos diferentes de predicción de errores en dicrómatas.....	283

▪ Tabla 6.38. Comparación de los resultados obtenidos en tres investigaciones diferentes que han empleado estímulos prototípicos para estudiar el uso de CCBs en daltónicos dicrómatas.....	299
▪ Tabla 6.39. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la distribución del porcentaje de aciertos y errores de cada CCB, obtenida en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, y las distribuciones obtenidas en investigaciones previas con estímulos prototípicos.....	301
▪ Tabla 6.40. Resumen de las hipótesis formuladas en la introducción respecto al uso de los TCBs por parte de daltónicos dicrómatas, los resultados que avalan dichas hipótesis, y cómo los Modelos A y B de predicción de errores pueden dar cuenta de dichos resultados.....	306
2.3. Capítulo 7: Estudio 2. Uso de términos de color básicos en personas de edad avanzada.....	
▪ Tabla 7.1. Observadores que tomaron parte en el Estudio 2.....	319
▪ Tabla 7.2.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores que pasaron los tests, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	322
▪ Tabla 7.2.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores con defectos tritán, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	322
▪ Tabla 7.3.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores que pasaron los tests, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	323
▪ Tabla 7.3.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores con defectos tritán, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	323
▪ Tabla 7.4.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores que pasaron los tests, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	324
▪ Tabla 7.4.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores con defectos tritán, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C, a los resultados de la tarea de mapa de colores.....	324

▪ Tabla 7.5. Conexiones entre CCB existentes en observadores mayores que no se dieron en tricrómatas normales.....	325
▪ Tabla 7.6. Stress bruto normalizado obtenido en las soluciones de diferentes análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de los observadores mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán, mostradas en las Tablas 7.2.1-7.2.2 (Estrategia A), 7.3.1-7.3.2 (Estrategia B) y 7.4.1-7.4.2 (Estrategia C).....	325
▪ Tabla 7.7. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en la solución tridimensional del análisis MDS no métrico aplicado a la matriz grupal de observadores mayores que pasaron los tests, mostrada en la Tabla 7.2.1 (Estrategia A).....	326
▪ Tabla 7.8. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de los análisis MDS realizados a partir de la matriz grupal de tricrómatas normales jóvenes y observadores mayores (Estrategia A).....	327
▪ Tabla 7.9. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de observadores mayores que pasaron los tests.....	327
▪ Tabla 7.10. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en la solución bidimensional del análisis MDS no métrico aplicado a la matriz grupal de mayores con defectos tritán mostrada en la Tabla 7.2.2 (Estrategia A).....	330
▪ Tabla 7.11. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensional y tridimensional de los análisis MDS realizados a partir de la matriz grupal de mayores con defectos tritán (Estrategia A).....	330
▪ Tabla 7.12. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en la solución tridimensional del análisis MDS aplicado a mayores que pasaron los tests y la solución bidimensional del análisis MDS aplicado a mayores con defectos tritán (Estrategia A).....	330
▪ Tabla 7.13. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales del análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de mayores con defectos tritán mostradas en las Tablas 7.2.2 (estrategia A), 7.3.2 (estrategia B) y 7.4.2 (estrategia B).....	331
▪ Tabla 7.14. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de mayores con defectos tritán.....	331
▪ Tabla 7.15.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	333

▪ Tabla 7.15.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	333
▪ Tabla 7.16. Errores más comunes tanto en observadores mayores que pasaron los tests como en observadores mayores con defectos tritán, y diferencias en los errores cometidos por ambos grupos.....	335
▪ Tabla 7.17.1. Número de observadores mayores que pasaron los tests que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores.....	335
▪ Tabla 7.17.2. Número de observadores mayores con defectos tritán que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores.....	335
▪ Tabla 7.18.1. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de los observadores mayores que pasaron los tests	336
▪ Tabla 7.18.2. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de los observadores mayores con defectos tritán	336
▪ Tabla 7.19. Asimetrías más destacables detectadas en las Tablas 7.15.1-7.15.2.....	336
▪ Tabla 7.20. Solapamiento entre los mapas de color de tricrómatas normales, mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán, establecidos a nivel grupal.....	337
▪ Tabla 7.21. Diferentes medidas de la ejecución de mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores (criterio estricto).....	337
▪ Tabla 7.22. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de aciertos y errores cometidos por mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores.....	351
▪ Tabla 7.23. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores para cada TCB a partir del Modelo C de predicción de errores basado en el filtrado prerretiniano sin compensación.....	352
▪ Tabla 7.24. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores para cada TCB, a partir del Modelo D de predicción de errores basado en el filtrado prerretiniano con compensación.....	354

▪ Tabla 7.25. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la distribución empírica del porcentaje de aciertos y errores de cada CCB, y las distribuciones derivada de las predicciones de los Modelos C y D.....	355
▪ Tabla 7.26. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la matriz de confusión empírica de cada observador, y las matrices de confusión derivadas de las predicciones de los Modelos C y D.....	355
▪ Tabla 7.27.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.....	358
▪ Tabla 7.27.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores con defectos tritán en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.....	358
2.4. Capítulo 8: Conclusiones.....	
2.5. Capítulo 9: Limitaciones de la presente investigación y perspectivas futuras.....	
Referencias Bibliográficas.....	
Anexo I: Procedimiento para analizar los errores cometidos en la tarea de mapa de colores. Resumen de los resultados derivados de aplicar el criterio laxo.....	
▪ Tabla AI.1.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	405
▪ Tabla AI.1.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	405
▪ Tabla AI.2.1. Número de observadores protanopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores según el criterio laxo para definir los aciertos.....	407
▪ Tabla AI.2.2. Número de observadores deuteranopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores según el criterio laxo para definir los aciertos.....	407
▪ Tabla AI.3. Asimetrías más destacables detectadas en las Tablas AI1.1-AI.1.2 y AI2.1-AI.2.2.....	408

▪ Tabla AI.4. Diferentes medidas de la ejecución de protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores, siguiendo el criterio laxo para definir los aciertos.....	408
▪ Tabla AI.5.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JMI (P6) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	409
▪ Tabla AI.5.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JJMC (P7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	409
▪ Tabla AI.6.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope AEM (D4) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	410
▪ Tabla AI.6.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope JD (D7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB.....	410
Anexo II: Procedimiento para calcular el índice de solapamiento.....	
▪ Tabla AII.1. Estímulos con diferente índice de solapamiento entre los mapas de color grupales de tricrómatas normales y protanopes.....	417
▪ Tabla AII.2. Estímulos con diferente índice de solapamiento entre los mapas de color grupales de tricrómatas normales y deuteranopes.....	417

Relación de Figuras

	Página
1. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas y personas de edad avanzada: Parte Teórica.....	
1.1. <i>Capítulo 1: Articulación de la presente investigación con líneas de investigación previas y futuras.....</i>	
1.2. <i>Capítulo 2: Fotometría y colorimetría: nociones básicas.....</i>	
▪ Figura 2.1: Funciones de eficiencia espectral fotópica y escotópica...	15
▪ Figura 2.2: Funciones de igualación de color y diagramas de cromaticidad.....	21
▪ Figura 2.3: Diagrama de cromaticidad CIE 1976	24
▪ Figura 2.4: Transmitancia espectral y densidad óptica del cristalino y del pigmento macular.....	26
1.3. <i>Capítulo 3: Alteraciones de la visión del color.....</i>	
▪ Figura 3.1: Estimulación presentada en un anomaloscopio.....	35
▪ Figura 3.2: Representación esquemática de los ajustes típicos de distintos tipos de observadores en el anomaloscopio.....	36
▪ Figura 3.3: Funciones de luminosidad de observadores daltónicos dicrómatas obtenidas por Pitt (1935).....	38
▪ Figura 3.4: Árbol genealógico que ilustra el modo de herencia de las alteraciones de la visión del color ligadas al cromosoma X.....	48
▪ Figura 3.5: Líneas de confusión representadas en un diagrama de activación de los conos.....	58
▪ Figura 3.6: Líneas de confusión y tipos de dicrómata.....	62
▪ Figura 3.7: Simulación de la apariencia del color en distintos tipos de dicromatismo y monocromatismo.....	66
▪ Figura 3.8: Densidad del cristalino y edad cronológica.....	78
▪ Figura 3.9: Umbrales de discriminación cromática a lo largo de una línea trítan en función del nivel de activación de los conos S.....	88
1.4. <i>Capítulo 4: Categorías de color básicas.....</i>	
▪ Figura 4.1: Valencia cromática de los mecanismos oponentes y coeficiente de matiz en función de la longitud de onda.....	106

▪ Figura 4.2: Modelo de visión del color en protanopes propuesto por Wachtler, Dohrmann y Hertel (2004).....	132
▪ Figura 4.3: Porcentaje de aciertos en la denominación de estímulos prototípicos de las CCB.....	143
2. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas y personas de edad avanzada: Parte Empírica.....	
2.1. Capítulo 5: Introducción a los estudios empíricos.....	
2.2. Capítulo 6: Estudio 1. Uso de términos de color básicos en daltónicos dicrómatas.....	
▪ Figura 6.1: Prototipos de las CCB cromáticas en tricrómatas normales y líneas de confusión para daltónicos dicrómatas.....	177
▪ Figura 6.2: Representación de las coordenadas cromáticas de los estímulos empleados en los estudios descritos en la presente tesis.....	183
▪ Figura 6.3: Representación bidimensional de las 11 CCB en tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes, realizada a partir de los resultados obtenidos en diferentes análisis MDS.....	197
▪ Figura 6.4: Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS tridimensional aplicado a tricrómatas normales.....	203
▪ Figura 6.5: Efecto de las transformaciones (reflexión y rotación) aplicadas a la solución bidimensional del análisis MDS obtenida en tricrómatas normales a partir de la estrategia C.....	205
▪ Figura 6.6: Distribución del porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores en función de las diferentes categorías.....	211
▪ Figura 6.7: Promedio del porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes para cada CCB.....	221
▪ Figura 6.8: Frecuencia de selección de estímulos para cada TCB por parte de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes.....	223
▪ Figura 6.9: Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”.....	227
▪ Figura 6.10: Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por protanopes en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”.....	228

▪ Figura 6.11: Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por deuteranopes en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”.....	229
▪ Figura 6.12: Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y protanopes en la tarea de mapa de colores.....	233
▪ Figura 6.13: Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y deuteranopes en la tarea de mapa de colores.....	235
▪ Figura 6.14: Estímulos seleccionados por tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores para amarillo y azul, y errores esperados para protanopes y deuteranopes...	240
▪ Figura 6.15: Estímulos seleccionados por tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes como pertenecientes a la categoría verde en la tarea de mapa de colores.....	243
▪ Figura 6.16: Representación de las coordenadas cromáticas de los centroides de las CCB cromáticas en el diagrama CIE u'v' 1976-1....	249
▪ Figura 6.17: Actividad rojo-verde residual en protanopes y deuteranopes.....	253
▪ Figura 6.18: Representación de las coordenadas cromáticas de los centroides de las CCB cromáticas en el diagrama CIE u'v' 1976-2.....	258
▪ Figura 6.19: Porcentaje de aciertos en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.....	266
▪ Figura 6.20: Estímulos seleccionados por protanopes en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares	268
▪ Figura 6.21: Estímulos seleccionados por deuteranopes en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares.....	270
▪ Figura 6.22: Relación entre el rendimiento obtenido por daltónicos dicrómatas en las dos tareas realizadas.....	275
2.3. Capítulo 7: Estudio 2. Uso de términos de color básicos en personas de edad avanzada.....	
▪ Figura 7.1: Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS tridimensional aplicado a los observadores mayores que pasaron los tests	326
▪ Figura 7.2: Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS bidimensional aplicado a observadores mayores.....	330

▪ Figura 7.3: Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS bidimensional aplicado a mayores con defectos tritán.....	331
▪ Figura 7.4: Distribución del porcentaje de errores cometidos por los observadores mayores que pasaron los tests y los observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores en función de las diferentes categorías.....	334
▪ Figura 7.5: Promedio del porcentaje de errores cometidos por observadores mayores que pasaron los tests y los que mostraron defectos tritán.....	338
▪ Figura 7.6: Frecuencia de selección de estímulos para cada TCB por parte de tricrómatas normales, mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán.....	339
▪ Figura 7.7: Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por los observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”.....	342
▪ Figura 7.8: Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por los observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”.....	343
▪ Figura 7.9: Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de mapa de colores.....	345
▪ Figura 7.10: Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores.....	347
▪ Figura 7.11: Cambios en la densidad óptica del cristalino asociados a la edad, y efecto sobre las coordenadas cromáticas de los estímulos empleados en la muestra.....	350
▪ Figura 7.12: Porcentaje de aciertos en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.....	358
▪ Figura 7.13: Estímulos seleccionados por los observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares...	360
▪ Figura 7.14: Estímulos seleccionados por los observadores mayores con defectos tritán en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares.....	362
▪ Figura 7.15: Relación entre el rendimiento obtenido por los observadores mayores en las dos tareas realizadas.....	365
<i>Capítulo 8: Conclusiones.....</i>	
<i>Capítulo 9: Limitaciones de la presente investigación y perspectivas futuras..</i>	

<ul style="list-style-type: none"> Figura 9.1: Representación de las coordenadas cromáticas de los centroides de las CCB cromáticas en el diagrama CIE $u'v'$ 1976-3.... 	384
Referencias Bibliográficas.....	
Anexo I: Procedimiento para analizar los errores cometidos en la tarea de mapa de colores. Resumen de los resultados derivados de aplicar el criterio laxo.....	
<ul style="list-style-type: none"> Figura AI.1. Distribución del porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores en función de las diferentes categorías 	406
Anexo II: Procedimiento para calcular el índice de solapamiento.....	
<ul style="list-style-type: none"> Figura AII.1. Relación entre el índice de solapamiento y el coeficiente de correlación de Pearson calculados a partir de los mapas de color grupales de tricrómatas normales y protanopes..... 	416

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a todos los participantes que, desinteresadamente, donaron parte de uno de los tesoros más valiosos de los que dispone el ser humano: su tiempo. Muy especialmente, me acuerdo mientras escribo estas líneas de aquellas personas que, desafortunadamente, nos han abandonado a día de hoy.

Al personal de las residencias y los centros de día de la tercera edad (Ballesol, Vitalia, y El Castillo), que nos abrieron sus puertas de forma altruista para que pudiéramos tomar parte de los datos que sustentan este trabajo.

A mi familia y mis amigos, que me han apoyado durante la realización de esta tesis. Sé que muchas veces habéis sufrido las consecuencias de que me haya metido en esta dura empresa, y eso no lo olvidaré.

Al Departamento de *Personalidad, Evaluación, y Tratamientos Psicológicos II (Psicología Diferencial y del Trabajo)* de la UCM, donde estuve disfrutando de una beca de colaboración, y posteriormente de otra de Formación de Profesorado Universitario (AP2001-575), concedida por el Ministerio de Educación, Cultura y Deporte.

Al C.E.S. C.U. Cardenal Cisneros, donde he empezado a formarme como docente, y especialmente a aquellos compañeros con los que he tenido oportunidad de trabajar como investigador en proyectos que han trascendido mis debilidades personales, la Psicología de la Percepción y la Ergonomía.

Y por supuesto, a Julio Lillo, no sólo mi director de tesis, sino, por encima de ello, mi amigo.

*Uso de Términos de Color
Básicos en Daltónicos Dicrómatas
y Personas de Edad Avanzada*

PARTE TEÓRICA

*“For the Rays to speak properly are not coloured. In them there is nothing else than a
certain Power and Disposition to stir up a Sensation of this or that Colour”
I. Newton*

1.1. CAPÍTULO 1: ARTICULACIÓN DE LA PRESENTE TESIS CON LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PREVIAS Y FUTURAS

Nuestro equipo de investigación viene desarrollando desde hace ya varios años diversas líneas de trabajo, que aunque puedan enumerarse de forma diferenciada, están íntimamente relacionadas. Se hace imperativo mencionar aquí las tres siguientes: 1) identificación y localización de las categorías de color básicas (CCB) del castellano (consúltese, por ejemplo, Lillo, Moreira, Vitini y Martín, 2007), 2) visión defectiva del color (Lillo y Moreira, 2004a), y 3) ergonomía visual y usabilidad (Lillo, 2000).

En esta tesis se han conjugado las dos primeras líneas de trabajo mencionadas, haciendo además posible transformar los resultados obtenidos en recomendaciones de carácter ergonómico, que de forma natural enriquezcan las aportaciones de nuestro equipo de investigación a la tercera línea indicada.

Gracias al estudio sobre la identificación y localización de las CCB, contamos con una buena base de datos sobre la categorización del color en tricrómatas normales, es decir, personas que gozan de una visión normal del color. Por otra parte, la investigación que hemos llevado a cabo en personas con visión defectiva del color, se ha centrado fundamentalmente en dos aspectos: las alteraciones existentes a nivel de sensibilidad espectral (Moreira, 2003; Lillo y Moreira, 2005), y los errores de denominación cometidos al nombrar estímulos de color (Lillo, Vitini, Caballero y Moreira, 2001).

La pregunta fundamental que intenta resolverse en esta tesis, es precisamente la siguiente: **¿cómo afectan las variables de carácter psicofísico, inherentes a las alteraciones de la percepción del color, a la categorización del mismo?** En concreto: se ha intentado articular la categorización del color de personas con distintos tipos de alteraciones cromáticas, con las características psicofísicas propias de dichas alteraciones, firmemente establecidas a nivel experimental a lo largo de décadas de investigación, y que conciernen tanto a la reducción en la discriminación cromática, como a la sensibilidad diferencial ante las longitudes de onda del espectro visible.

Y es así como llegamos a estudiar el uso que dos grupos de observadores, **daltónicos dicrómatas**, de una parte, y **personas de edad avanzada**, de otra, hacen de los **términos de color básicos** de su idioma. Los daltónicos siempre han sido una especial debilidad en nuestro equipo de investigación, y las personas mayores se han ido del mismo modo abriendo un importante hueco en nuestras prioridades (Lillo y Moreira, 2004b). Mi estancia en la Universidad de Surrey junto con el equipo de investigación de Ian Davies, ilusionado también por estos temas, acrecentó en gran medida este interés.

En esta tesis se presentan datos sobre categorización del color en protanopes, deuteranopes, y personas de edad avanzada, que pueden resultar útiles tanto a nivel teórico, como aplicado. Se ha realizado un gran esfuerzo para poder llevar a cabo un análisis de los datos a nivel tanto *descriptivo*, como *predictivo y explicativo*. Por esta razón, el problema objeto de estudio ha sido analizado desde diferentes puntos de vista, y empleando **técnicas de análisis de datos muy variadas** (desde una técnica de análisis multivariante como el escalamiento multidimensional, hasta el análisis colorimétrico de los errores cometidos).

Sin duda, esta forma de proceder no es la más habitual en este tipo de investigaciones, pero en ella reside uno de los pilares más fuertes sobre los que descansa esta tesis. A continuación mencionaremos otro de los pilares básicos de esta investigación.

Desde el punto de vista teórico, los análisis de los datos no se han limitado a evaluar las **hipótesis** de partida, sino que además se ha puesto un gran empeño en **desarrollar modelos** para intentar predecir y explicar las confusiones acaecidas. En concreto: 1) se ha desarrollado y, a juzgar por el ajuste conseguido, perfeccionado, un modelo previo de predicción de errores en daltónicos dicrómatas (Lillo, Davies, Collado, Ponte, y Vitini, 2001), y 2) se han sentado las bases para intentar modelar el comportamiento de observadores de edad avanzada en el terreno de la categorización del color.

En relación al primer punto, merece la pena señalar que, en un trabajo previo, en el que se presentaron resultados preliminares obtenidos en esta tesis (Lillo y Moreira, 2008), subrayábamos la inadecuación del modelo original expuesto en el trabajo de

Lillo, Davies et al. (2001), y **apuntábamos la necesidad de concretar un nuevo modelo**. Sin temor a equivocarnos, y teniendo siempre en cuenta las limitaciones de esta investigación (consúltese el capítulo 9), creo que es de justicia afirmar que, siguiendo los imperativos del método científico, hemos avanzado sin lugar a dudas en este objetivo.

He de reconocer que ha sido un trabajo realmente duro (y que en ocasiones me parecía interminable), pero a juzgar por la recompensa, el esfuerzo ha merecido la pena. Esperamos poder validar, y, en su caso, mejorar, los modelos que aquí se plantean. Para ello, existen diferentes vías de actuación, una de las cuales se menciona en el apartado de limitaciones y futuras líneas de investigación.

Un punto que merece especial atención es que, si bien la mayor parte de los análisis se han efectuado a nivel grupal, también se ha tomado el **comportamiento individual** como objeto de análisis. La importancia de esta puntualización es obvia: dentro de cada grupo de observadores, ya sean protanopes, deuteranopes, o personas mayores, existe un innegable grado de heterogeneidad.

Para terminar, haremos un breve repaso sobre la estructura de este trabajo. Esta tesis se divide en una parte teórica y otra empírica. En la **parte teórica** se sientan las nociones básicas sobre fotometría y colorimetría (capítulo 2), los tipos de visión defectiva del color estudiados (capítulo 3), y el concepto de CCB (capítulo 4). En la **parte empírica** se introducen los dos estudios efectuados sobre el uso de términos de color básicos en personas con alteraciones en la percepción del color (capítulo 5), que pasan a desarrollarse minuciosamente a continuación. El primero se centra en daltónicos dicrómatas (capítulo 6), y el segundo en personas mayores (capítulo 7). La parte empírica acaba con las conclusiones más relevantes que pueden extraerse de esta tesis (capítulo 8), sin olvidar hacer mención a las limitaciones de la presente investigación (capítulo 9).

1.2. CAPÍTULO 2: FOTOMETRÍA Y COLORIMETRÍA: NOCIONES BÁSICAS

En este capítulo se describen brevemente algunos de los conceptos radiométricos, fotométricos y colorimétricos que serán utilizados a lo largo de esta tesis. En primer lugar (sección 1.2.1), se define la *longitud de onda*, y se presentan las cantidades radiométricas más importantes, así como sus equivalentes fotométricas. Tras introducir los conceptos de *función oficial de eficiencia espectral* (sección 1.2.2) y de *funciones de igualación del color* (sección 1.2.3), se sientan las bases del álgebra matricial necesaria para pasar de un sistema de primarios a otro diferente (sección 1.2.4), con un doble objetivo: (1) presentar el sistema internacional de especificación y medición del color *CIE 1931 XYZ*, y (2) mostrar la relación existente entre las curvas de sensibilidad espectral de los conos presentes en la retina humana y las funciones de igualación de color (secciones 1.2.5 y 1.2.6).

A continuación (sección 1.2.7), se explica la influencia del filtrado prerretiniano sobre la determinación experimental de funciones psicofísicas. Por último, se llama la atención sobre las limitaciones de la fotometría y la colorimetría a la hora de predecir los aspectos básicos relacionados con la percepción del color (sección 1.2.8).

1.2.1. RADIOMETRÍA Y FOTOMETRÍA

Frecuencia, longitud de onda, y energía

La luz es aquella parte del espectro de radiación electromagnética visible por el ser humano (Pokorny y Smith, 1986). Actualmente se defiende que está compuesta por cuantos de energía (fotones) que se comportan, en parte, como si fueran partículas, y en parte, como si fueran ondas (dualidad onda-corpúsculo; Packer y Williams, 2003; Kaiser y Boynton, 1996; Wyszecki y Stiles, 1982). Cada fotón vibra a una *frecuencia* característica, ν , definida como el inverso del periodo, T , que es el tiempo que una onda tarda en recorrer un ciclo ($\nu = 1/T$). La *longitud de onda*, λ , se define como el espacio recorrido por la onda en un ciclo. Puesto que la velocidad de la luz en el vacío, c , está

establecida aproximadamente en $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, frecuencia temporal y longitud de onda quedan relacionadas de la siguiente manera (Wyszecki y Stiles, 1982):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} \quad (1)$$

donde λ vendría expresada en metros, aunque lo habitual es utilizar el nanómetro como unidad de medida de la longitud de onda ($\text{nm} = 10^{-9} \text{ m}$). A pesar de que por diferentes motivos¹ sería más conveniente referirse al espectro visible en términos de frecuencia, es práctica habitual recurrir a la longitud de onda para dicho propósito, razón por la cual seguiremos esta convención. Así, es mucho más habitual encontrar en la literatura especializada (véase por ejemplo Pokorny y Smith, 1986; Kaiser y Boynton, 1996) que los límites del espectro visible se sitúan en 400 y 700 nm aproximadamente (en lugar de en $7,5 \cdot 10^{14}$ y $4,29 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$, a pesar de que esta información es análoga a la anterior).

Atendiendo a la composición espectral de un estímulo, se puede diferenciar entre *estímulos espectrales* (o *monocromáticos*), aquellos que acumula energía en una única longitud de onda, y *compuestos*, que acumulan energía en un rango determinado de longitudes de onda. La mayor parte de los estímulos de color, ya sean naturales o artificiales, son compuestos. El *estímulo equienergético*, que acumula la misma cantidad de energía para todas las longitudes de onda, es una clase especial de estímulo compuesto, que se emplea, como veremos, en múltiples cálculos colorimétricos.

La energía de un fotón, E , es proporcional a la frecuencia, o lo que es lo mismo, está inversamente relacionada con la longitud de onda (Packer y Williams, 2003):

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2)$$

donde h es la *constante de Planck* (aproximadamente $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), c es la velocidad de la luz en el vacío, y λ viene expresada en metros.

¹ Desde el punto de vista físico, la frecuencia de la radiación electromagnética no varía en función del medio por el que esté viajando (cosa que no ocurre con la longitud de onda). Además, en visión del color se sabe que la forma del espectro de absorción de muchos fotopigmentos, de representarse en función de la frecuencia, se mantiene aproximadamente constante, a pesar de la localización de su máximo (cosa que no ocurre de representarse en función de la longitud de onda).

Principales unidades radiométricas y fotométricas

Tanto la radiometría como la fotometría tienen como objetivo la medición de la radiación electromagnética (Packer y Williams, 2003). Sin embargo, la primera se ocupa de medirla desde un punto de vista puramente físico (en unidades de energía), mientras que la fotometría se encarga de la medición de la luz teniendo en cuenta la sensibilidad del sistema visual humano (SVH) en función de la longitud de onda del espectro visible, con el objetivo de derivar lecturas más acordes a la experiencia visual.

La energía radiante, Q_e , medida en julios (J), es el total de energía electromagnética emitida por un estímulo. Su uso es muy limitado en visión del color, puesto que no informa sobre las variaciones espacio-temporales de la estimulación. A continuación se describen brevemente las cantidades radiométricas más importantes, que sí incorporan este tipo de información, y que se encuentran resumidas en la Tabla 2.1. El *flujo* (o *potencia*) *radiante*, P_e , se define como la cantidad de energía radiante emitida, transferida, o recibida, por unidad de tiempo, y se mide en W. La *intensidad radiante*, I_e , que es el flujo radiante emitido por unidad de ángulo sólido, se emplea cuando se quiere especificar la cantidad de radiación emitida en una dirección dada, y se mide en $\text{W}\cdot\text{Sr}^{-1}$. La *irradiancia*, E_e , es la potencia radiante incidente por unidad de superficie, y se mide en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$. Por último, la *radiancia*, L_e , especifica la potencia radiante en una dirección dada por unidad de superficie, y se mide en $\text{W}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Tal y como especifica la Tabla 2.2, todas y cada una de estas medidas y unidades radiométricas tienen su correspondiente fotométrica. En el apartado siguiente se especifica cómo se pasa de unidades radiométricas a fotométricas.

Tabla 2.1. Principales unidades radiométricas. Confeccionado a partir de Packer y Williams (2003, Tabla 2.2), y Wyszecki y Stiles (1982, Tabla 1(1.1)).

Término	Símbolo	Ecuación	Unidad
Flujo radiante	P_e	$P_e = dQ_e/dt$	W
Intensidad radiante	I_e	$I_e = dP_e/d\omega$	$\text{W}\cdot\text{Sr}^{-1}$
Irradiancia*	E_e	$E_e = dP_e/dA$	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Radiancia*	L_e	$L_e = dI_e/dA = dE_e/d\omega$	$\text{W}\cdot\text{Sr}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$

*: En las ecuaciones indicadas no se tiene en cuenta la orientación de la superficie radiante o irradiada con respecto a la dirección de la medición.

Tabla 2.2. Correspondencia entre medidas radiométricas y fotométricas. A partir de Packer y Williams (2003, Tabla 2.2), y Wyszecki y Stiles (1982, Tabla 1(4.1)).

Radiometría			Fotometría		
Término	Símbolo	Unidad	Término	Símbolo	Unidad
Flujo radiante	P_e	W	Flujo lumínico	P_u	lm
Intensidad radiante	I_e	$W \cdot Sr^{-1}$	Intensidad lumínica	I_u	$cd = lm \cdot Sr^{-1}$
Irradiancia	E_e	$W \cdot m^{-2}$	Illuminancia	E_u	$lux = lm \cdot m^{-2}$
Radiancia	L_e	$W \cdot Sr^{-1} \cdot m^{-2}$	Luminancia	L_u	$cd \cdot m^{-2}$

Si se desea mantener la información referente a la longitud de onda, las mediciones radiométricas se expresan mediante *funciones espectrales*, que informan de la concentración de energía en función de la longitud de onda. Para hacer referencia a funciones espectrales, se incluye el símbolo (λ) después del símbolo correspondiente, (véase la Tabla 2.1), de tal forma que, por ejemplo, $L_e(\lambda)$ simboliza la función de distribución de radiancia espectral. Como contraposición, cualquier medida fotométrica pierde toda información referente a la longitud de onda, expresándose mediante un único numero, como veremos en el siguiente apartado (Packer y Williams, 2003).

Temperatura correlacionada de color

Puesto que es habitual especificar la apariencia de un iluminante haciendo referencia a su temperatura correlacionada de color, y de hecho así se hará en la parte empírica de esta tesis, introduciremos brevemente este concepto. La incandescencia es la generación de radiación mediante un incremento en la temperatura de un cuerpo sólido o de un líquido (Hunt, 1995) (como por ejemplo ocurre en las lámparas de tungsteno). A medida que aumenta la temperatura, lo hace también la cantidad total de radiación, y la distribución espectral relativa sufre una modificación. De este modo, a temperaturas más bajas (en torno a los 1500 K), habrá más energía relativa en longitudes de onda largas, y la apariencia de la fuente será rojiza. A medida que se aumenta esta temperatura, habrá progresivamente más energía en longitudes de onda más cortas, pasando de una apariencia rojiza a una amarillenta (por ejemplo, 3200 K), blanca (en torno a 5500-6500 K), y finalmente azulada (por ejemplo, 8000 K). Se entiende con el nombre de *radiador perfecto* (o cuerpo negro), aquél que emite radiación cuyas características dependen únicamente de su temperatura (Wyszecki y Stiles, 1982; Pokorny y Smith, 1986), de manera que la distribución de exitancia espectral de la energía que emite depende exclusivamente de su temperatura medida en kelvin (K), tal y como expresa la conocida como *fórmula de Planck* (Wyszecki y Stiles,

1982). La *temperatura de color*, T_c , de una fuente, es la temperatura en K que debe alcanzar un radiador perfecto para que sus coordenadas cromáticas (véase la sección 1.2.5) sean idénticas a las de dicha fuente. A modo de ejemplo, las lámparas de tungsteno operan en torno a los 2500-3200 K (Hunt, 1995). La *temperatura correlacionada de color*, T_{cp} , de una fuente, se reserva para aquellas situaciones en las que las cromaticidades de la fuente y del radiador perfecto no coinciden, y expresa la temperatura en K que debe alcanzar un radiador perfecto para que su cromaticidad sea lo más similar posible a la dicha fuente. T_{cp} se emplea, por ejemplo, cuando la radiación proveniente de una lámpara de tungsteno se altera empleando filtros azules, para conseguir una iluminación más equienergética, y por tanto una temperatura correlacionada de color más elevada.

Caracterización espectral de filtros y superficies

Cuando la luz atraviesa un filtro, o cuando se refleja en una superficie, sufre un cambio en su composición espectral (a no ser que se trate de un transmisor o un difusor perfectos). La *transmitancia espectral* de un filtro, $\tau(\lambda)$, se define como (Wysecki y Stiles, 1982 sección 1.3; la siguiente ecuación incluye, además de la radiación absorbida por el filtro, el pequeño porcentaje de radiación reflejada por el mismo)

$$\tau(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \quad (3)$$

donde $P_0(\lambda)$ es el flujo radiante que incide sobre el filtro en función de la longitud de onda, y $P(\lambda)$ es el flujo radiante que lo atraviesa, también en función de la longitud de onda. Si $\tau(\lambda)$ es constante, se dice que el filtro es *neutral* o no selectivo. En caso contrario, el filtro es *selectivo*. Como veremos en la sección 1.2.7, el cristalino es un ejemplo natural de filtro selectivo. La densidad espectral de un filtro se calcula a partir de su transmitancia según

$$d(\lambda) = \log \frac{1}{\tau(\lambda)} = -\log \tau(\lambda) \quad (4)$$

De manera análoga a la transmitancia, se define la *reflectancia espectral* de una superficie, $\rho(\lambda)$, como (Wysecki y Stiles, 1982, sección 1.4)

$$\rho(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{P_0(\lambda)} \quad (5)$$

donde $P_0(\lambda)$ es el flujo radiante que incide sobre la superficie, y $P(\lambda)$ es el flujo radiante reflejado por esta, ambos en función de la longitud de onda. Si $\rho(\lambda)$ es constante, la reflectancia del objeto es *neutral* o no selectiva, siendo *selectiva* en caso contrario. Si, a partir del espectro de una fuente, se desea calcular la composición espectral de la luz que atraviesa un filtro o que refleja una superficie, basta con multiplicar el espectro de la fuente por el espectro de transmitancia o el espectro de reflectancia, respectivamente.

Principales atributos perceptivos y sus correlatos físicos

La distinción entre *colores relacionados* y *no relacionados* hace referencia a cómo se presentan estímulos de color en el campo visual (Capilla et al., 2002, Kaiser y Boynton, 1996; Hunt, 1995). Un *color no relacionado* es aquél que se presenta aisladamente en el campo visual, mientras que un *color relacionado* se ve en presencia de otros. La experiencia visual de color, en el caso de colores no relacionados, puede describirse adecuadamente mediante la especificación del valor que toma aquella en las tres dimensiones perceptivas siguientes: *tono* (o *matiz*), *brillo*, y *saturación*. El *tono* o *matiz*, definido como la cualidad de un color que permite clasificarlo como, por ejemplo, rojizo, verdoso, amarillento, o azulado, viene determinado fundamentalmente por la longitud de onda (longitud de onda dominante, en el caso de estímulos compuestos). El *brillo*, o intensidad percibida de un color, viene determinado fundamentalmente por la radiancia (o más exactamente la *luminancia*). Por último, la *saturación* es la viveza o pureza con la que se experimenta un color, siendo la anchura de banda de la distribución espectral el atributo físico más relacionado. Sin embargo, para *colores relacionados*, la tríada tono-brillo-saturación no es suficiente, necesitándose de otros parámetros para completar una adecuada descripción de la experiencia visual, como son la *claridad* y el *croma*.

1.2.2. FUNCIÓN OFICIAL DE EFICIENCIA ESPECTRAL

La CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*, Comisión Internacional de la Iluminación) es el organismo internacional que dicta los estándares referentes a las mediciones fotométricas y colorimétricas. Los dos pasos clave a seguir para obtener medidas fotométricas a partir de las radiométricas son (1) la ponderación del espectro que caracteriza el estímulo de interés mediante la *función oficial de eficiencia espectral*, y (2) la integración de la función resultante. La Figura 2.1 muestra las funciones de eficiencia espectral fotópica, $V(\lambda)$, y escotópica, $V'(\lambda)$, que definen al *observador patrón fotométrico fotópico* y *escotópico*, respectivamente (la visión escotópica está mediada por los bastones, y la fotópica por los conos). La razón por la cual se lleva a cabo esta ponderación es que el SVH no es igualmente sensible a las diferentes longitudes de onda que componen el espectro visible, caracterizándose este hecho empírico precisamente mediante las funciones de eficiencia espectral. La lógica que justifica el segundo paso se explica a continuación.

El supuesto básico de la fotometría es que dos estímulos, independientemente de su distribución espectral relativa, pueden igualarse en la dimensión brillo, simplemente ajustando su intensidad (Wysecki y Stiles, 1982, capítulo 4). Además, sean A y B dos estímulos de color, y denotando el símbolo “ \equiv ” una igualación visual en términos de la dimensión brillo, las leyes de la fotometría son las siguientes (Wysecki y Stiles, 1982):

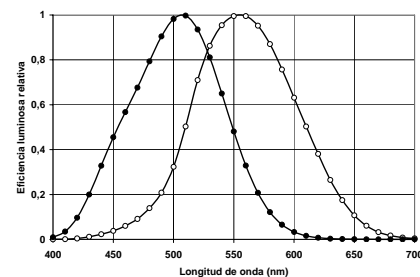


Figura 2.1. Funciones de eficiencia espectral fotópica (círculos blancos) y escotópica (círculos negros). Valores tabulados en Wysecki y Stiles (1982, Tabla 1(4.3.2)).

1. Ley de simetría. $(A \equiv B) \leftrightarrow (B \equiv A)$.
2. Ley de transitividad. $(A \equiv B) \wedge (B \equiv C) \leftrightarrow (A \equiv C)$.
3. Ley de proporcionalidad. $(A \equiv B) \leftrightarrow (\alpha A \equiv \alpha B)$, donde α es cualquier factor positivo que multiplica la radiancia espectral del estímulo, incrementándola o reduciéndola, sin que su distribución espectral relativa se vea afectada.
4. Ley de aditividad. $(A \equiv B) \wedge (C \equiv D) \leftrightarrow (A + C \equiv B + D)$, donde “+” simboliza una mezcla aditiva de luces.

Si bien las dos primeras pueden parecer triviales, las leyes de proporcionalidad y de aditividad permiten aplicar las propiedades de los sistemas lineales a la medición fotométrica, razón por la cual, si consideramos un estímulo de color como un compuesto de estímulos espectrales, la correspondiente fotométrica, X_v , de cualquier medida radiométrica espectral $X_e(\lambda)$ (véanse las Tablas 1.1 y 1.2), se calcula de la siguiente manera:

$$X_v = K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} X_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda \quad (6)$$

donde λ_a y λ_b son los límites del espectro visible (400 y 700 nm aproximadamente), $V(\lambda)$ es la función oficial de eficiencia espectral fotópica, y $K_m = 683 \text{ lm/W}$ es la constante fotométrica para condiciones fotópicas (en condiciones escotópicas, habría que sustituir $V(\lambda)$ por $V'(\lambda)$ y K_m por $K'_m = 1700 \text{ lm/W}$).

Ahora bien, la fotometría a nivel fotópico, donde existe la percepción de color, tiene dos limitaciones importantes. La primera de ellas atañe a la validez del supuesto de aditividad. Concretamente, este solo se cumple para determinados métodos, como la *fotometría heterocromática de fluctuación*, pero no para otros, como la *igualación heterocromática de brillo* (Le Grand, 1972; Wyszecki y Stiles, 1982; Pokorny y Smith, 1986; Capilla et al., 2002).

La segunda limitación radica en la propia naturaleza de la función oficial de eficiencia espectral, $V(\lambda)$. Por un lado, existe un acuerdo general en que dicha función infraestima la sensibilidad del SVH para longitudes de onda corta (Judd, 1951, propuso la función $V_M(\lambda)$, refinada posteriormente por Vos, 1978, para corregir este hecho). Por otra parte, $V(\lambda)$ resultó de un promedio calculado a partir de la eficiencia espectral de diferentes observadores, restando importancia a la existencia de diferencias individuales (Kaiser, 1988) y, sobre todo, no reflejando adecuadamente la sensibilidad espectral de observadores con determinadas alteraciones en la visión del color, como veremos con más detalle en el capítulo 2.

1.2.3. TRICROMATICIDAD Y FUNCIONES DE IGUALACIÓN DEL COLOR

La existencia de *estímulos metaméricos* (aquellos que, a pesar de ser físicamente diferentes, son perceptivamente iguales) pone de manifiesto las limitaciones del SVH para distinguir estímulos a partir de su composición espectral. La colorimetría se basa en dicha limitación para especificar y medir el color. En términos más concretos, la visión normal del color cumple la *propiedad de tricromaticidad*: a partir de la mezcla aditiva de tres *primarios* convenientemente elegidos (ninguno de ellos puede igualarse a partir de la mezcla de los otros dos), se puede conseguir cualquier color (Smith y Pokorny, 2003; Wyszecki y Stiles, 1982, sección 3.2.1). Además, si A y B son dos estímulos de color, y el símbolo “ \equiv ” denota una igualación visual completa, las leyes de la mezcla aditiva de luces (versión moderna de las conocidas como leyes de Grassman) son las siguientes (Smith y Pokorny, 2003; Wyszecki y Stiles, 1982):

1. Ley de simetría. $(A \equiv B) \leftrightarrow (B \equiv A)$.
2. Ley de transitividad. $(A \equiv B) \wedge (B \equiv C) \leftrightarrow (A \equiv C)$.
3. Ley de proporcionalidad. $(A \equiv B) \leftrightarrow (\alpha A \equiv \alpha B)$, donde α es cualquier factor positivo que multiplica la radiancia espectral del estímulo, incrementándola o reduciéndola, sin que su distribución espectral relativa se vea afectada.
4. Ley de aditividad. $(A \equiv B) \wedge (C \equiv D) \leftrightarrow (A + C \equiv B + D)$, donde “+” simboliza una mezcla aditiva de luces.

El cumplimiento de las dos últimas hace posible tratar la mezcla aditiva de luces como si se tratara de un sistema lineal, considerando un estímulo como compuesto de estímulos monocromáticos de diferente longitud de onda, y caracterizando la mezcla de luces mediante las conocidas como *funciones de igualación de color*, que especifican, para cada longitud de onda, los denominados *valores triestímulo*: la cantidad necesaria que hay que añadir de cada uno de los tres primarios que sirven como base para conseguir metamerizar (igualar visualmente) dicha longitud de onda (véanse las Figuras 2.2A-2.2C). Bajo este esquema, la mezcla aditiva de luces se trata formalmente sumando los valores triestímulo de los componentes.

1.2.4. CAMBIO DE UN SISTEMA DE PRIMARIOS A OTRO

Supongamos que a partir de la experimentación psicofísica se han determinado las *funciones de igualación* $R(\lambda)$, $G(\lambda)$, y $B(\lambda)$, que especifican la cantidad necesaria de cada primario, \mathbf{R} , \mathbf{G} , y \mathbf{B} , respectivamente, necesaria para metamerizar las diferentes longitudes de onda, λ . Posteriormente, se desea pasar al nuevo sistema de primarios \mathbf{R}' , \mathbf{G}' , \mathbf{B}' , diferente del anterior. Esto implica obtener las cantidades necesarias de \mathbf{R}' , \mathbf{G}' , y \mathbf{B}' , de manera que su mezcla aditiva sea metamérica de las diferentes longitudes de onda. Cada uno de los nuevos primarios (\mathbf{R}' , \mathbf{G}' , \mathbf{B}') puede expresarse como una combinación lineal de los anteriores. En notación vectorial: $\mathbf{R}' = (R_{R'}, G_{R'}, B_{R'})$, $\mathbf{G}' = (R_{G'}, G_{G'}, B_{G'})$, y $\mathbf{B}' = (R_{B'}, G_{B'}, B_{B'})$. De la misma manera, la mezcla aditiva de los nuevos primarios puede expresarse en términos de los anteriores. En notación matricial

$$\begin{pmatrix} R(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{B'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R'(\lambda) \\ G'(\lambda) \\ B'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (7)$$

donde $R'(\lambda)$, $G'(\lambda)$, y $B'(\lambda)$ son las cantidades desconocidas (incógnitas) de los primarios (\mathbf{R}' , \mathbf{G}' , \mathbf{B}') que metamerizan las diferentes longitudes de onda λ . Resolviendo esta ecuación (para lo cual la matriz que posibilita la transformación debe tener inversa, o sea, su determinante es distinto de 0), nos queda la ecuación que permite pasar del sistema de primarios (\mathbf{R} , \mathbf{G} , \mathbf{B}) al (\mathbf{R}' , \mathbf{G}' , \mathbf{B}'):

$$\begin{pmatrix} R'(\lambda) \\ G'(\lambda) \\ B'(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{R'} & R_{G'} & R_{B'} \\ G_{R'} & G_{G'} & G_{B'} \\ B_{R'} & B_{G'} & B_{B'} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{pmatrix} \quad (8)$$

Una transformación de este tipo, conocida como *transformación lineal homogénea* o *transformación afín* (Smith y Pokorny, 2003, pp. 109-110; Wyszecki y Stiles, 1982, sección 3.2.5), tiene algunas propiedades como son: (i) las líneas que eran rectas en el espacio original lo siguen siendo en el nuevo, (ii) las líneas que eran paralelas lo siguen siendo, y (iii) las superficies (planos) lo siguen siendo. En caso de no conocer los valores triestímulo de los nuevos primarios en términos de los anteriores,

puede aun realizarse un cambio de primarios, siempre que se conozcan las coordenadas cromáticas de los nuevos primarios en el sistema original. Partiendo de (7), y definiendo

$$k_{R'} = \frac{1}{R_{R'} + G_{R'} + B_{R'}} \quad k_{G'} = \frac{1}{R_{G'} + G_{G'} + B_{G'}} \quad k_{B'} = \frac{1}{R_{B'} + G_{B'} + B_{B'}}$$

obtenemos:

$$\begin{pmatrix} R(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{R'}r_{R'} & k_{G'}r_{G'} & k_{B'}r_{B'} \\ k_{R'}g_{R'} & k_{G'}g_{G'} & k_{B'}g_{B'} \\ k_{R'}b_{R'} & k_{G'}b_{G'} & k_{B'}b_{B'} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R'(\lambda) \\ G'(\lambda) \\ B'(\lambda) \end{pmatrix} \quad (9)$$

por lo que

$$\begin{pmatrix} R'(\lambda) \\ G'(\lambda) \\ B'(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{R'}r_{R'} & k_{G'}r_{G'} & k_{B'}r_{B'} \\ k_{R'}g_{R'} & k_{G'}g_{G'} & k_{B'}g_{B'} \\ k_{R'}b_{R'} & k_{G'}b_{G'} & k_{B'}b_{B'} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} R(\lambda) \\ G(\lambda) \\ B(\lambda) \end{pmatrix} \quad (10)$$

donde se aprecia que $k_{R'}$, $k_{G'}$, y $k_{B'}$ son factores de escalamiento, de los que depende el peso relativo de las nuevas funciones de igualación de color $R'(\lambda)$, $G'(\lambda)$, y $B'(\lambda)$. De forma alternativa, se puede conseguir un cambio en el sistema de primarios directamente a partir de los coeficientes de cromaticidad (véase la sección 1.2.5), mediante una *transformación proyectiva* (Smith y Pokorny, 2003, pp. 109-110; Wyszecki y Stiles, 1982, sección 3.2.5), en la que (i) las líneas rectas lo siguen siendo, pero sin embargo (ii) las líneas paralelas no tienen por qué seguir siéndolo. Las dos últimas transformaciones permiten utilizar primarios imaginarios cuya cromaticidad cae fuera del locus espectral (véase la siguiente sección). A lo largo de la historia de la ciencia del color, el cambio de un sistema de primarios a otro ha tenido (y sigue teniendo) diferentes finalidades, como son (Smith y Pokorny, 2003): (i) la comparación de diferentes bases de datos, (ii) la derivación de un sistema de primarios imaginarios a partir de otro basado en primarios reales (véase la sección 1.2.5), (iii) la búsqueda de diagramas de cromaticidad más uniformes (sección 1.2.5), (iv) la derivación de los fundamentales de los conos (sección 1.2.6), y (v) la derivación de primarios que modelen la sensibilidad espectral de canales oponentes.

1.2.5. SISTEMA INTERNACIONAL DE MEDICIÓN DEL COLOR

Sistema CIE 1931 RGB

La CIE estableció en 1931, mediante dos sistemas equivalentes, el *RGB* y el *XYZ*, el que se conoce como *Observador Patrón Colorimétrico CIE 1931*, que expresa las propiedades de la igualación de color del observador tricrómatas normal promedio para estímulos de 2°, y sobre el cual se sientan las bases de la colorimetría².

El sistema *CIE 1931 RGB* tiene como primarios (**R**, **G**, **B**) los estímulos monocromáticos reales $\lambda_R = 700$ nm, $\lambda_G = 546,1$ nm, y $\lambda_B = 435,8$ nm, para los que define las funciones de igualación de color $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, y $\bar{b}(\lambda)$, representadas en la Figura 2.2A. Dichas funciones especifican los valores triestímulo del estímulo equienergético (de potencia radiante igual a la unidad) para cada longitud de onda del espectro visible. En este sistema, los valores triestímulo están ajustados para que se cumpla la siguiente condición:

$$\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \bar{r}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \bar{g}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (11)$$

A partir de la propiedad de linealidad, los *valores triestímulo*, R , G , B , de cualquier estímulo cuya función de potencia radiante espectral sea $P(\lambda)$, se definen como

$$R = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda \quad G = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda \quad B = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda \quad (12)$$

donde λ_a y λ_b son los límites del espectro visible (400 y 700 nm aproximadamente), y $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, y $\bar{b}(\lambda)$ son las funciones de igualación de color *CIE RGB 1931*.

² La base experimental que posibilitó el desarrollo del *Observador Patrón Colorimétrico CIE 1931* se obtuvo con estímulos de tamaño visual igual a 2°. La CIE recomienda su uso para estímulos que subtienden un ángulo visual entre 1° y 4° (Wyszecki y Stiles, 1982). Para estimulaciones mayores de 4°, debe emplearse el *Observador Patrón Colorimétrico Suplementario CIE 1964*, caracterizado mediante las funciones de igualación de color $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, y $\bar{z}_{10}(\lambda)$, obtenidas a partir de experimentos de igualación realizados con estímulos de 10° bajo fijación foveal e iluminación fotópica.

Dos estímulos cualesquiera serán metaméricos si $R_1 = R_2$, $G_1 = G_2$, y $B_1 = B_2$. Por último, en el sistema RGB la luminancia es computable a partir de los valores triestímulo R , G y B ya que se cumple que $V(\lambda)$ es una combinación lineal de $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, y $\bar{b}(\lambda)$: $V(\lambda) = \bar{r}(\lambda) + 4,5907\bar{g}(\lambda) + 0,0601\bar{b}(\lambda)$.

Puesto que el sistema *CIE RGB 1931* presentaba los siguientes inconvenientes: (1) las funciones de igualación de color incluían valores negativos, (2) el cálculo de la luminancia requería de un cómputo extra, y (3) la construcción de instrumentos colorimétricos se veía dificultada por estas características, la CIE derivó, a partir del sistema RGB , el XYZ , que se emplea internacionalmente y se describe a continuación.

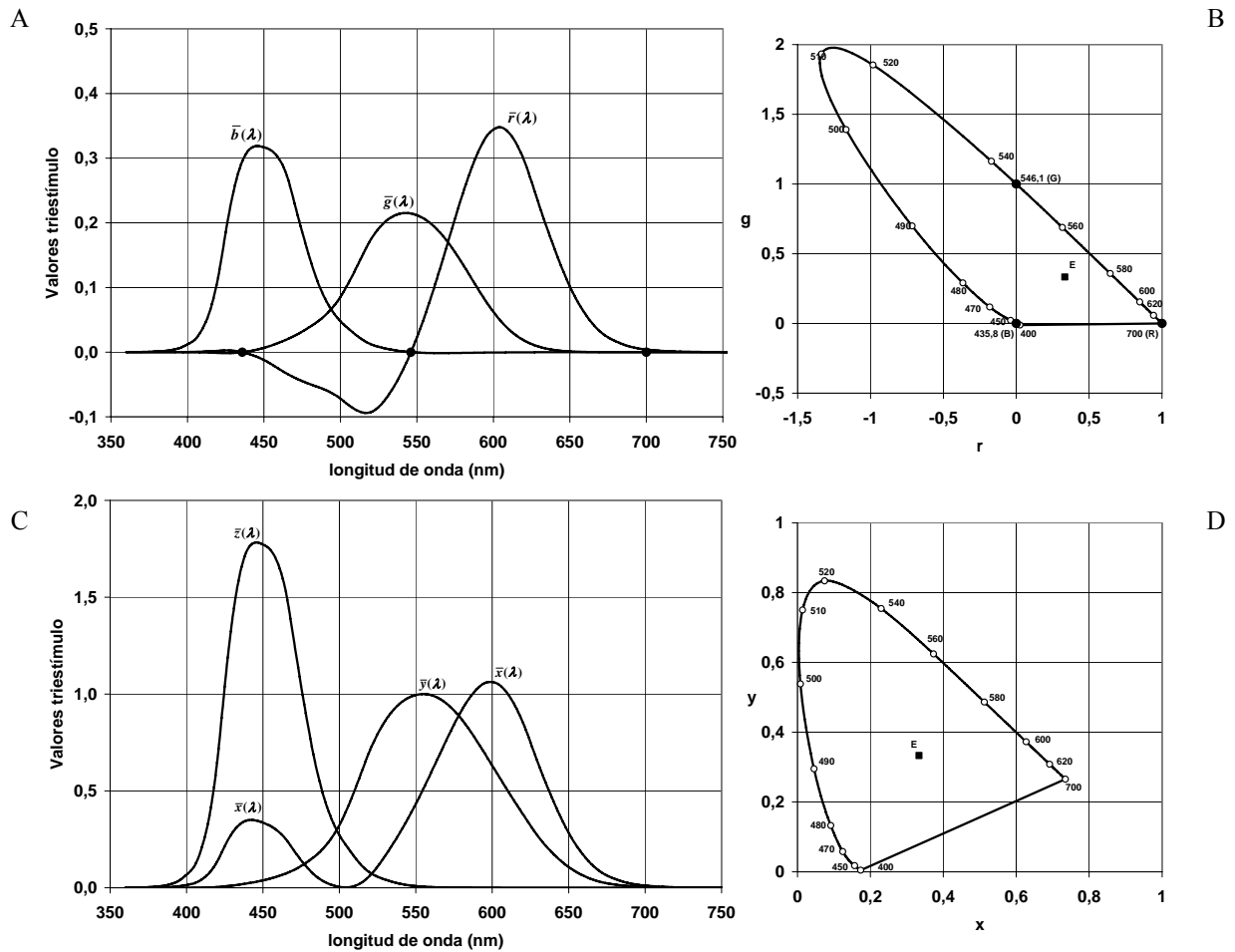


Figura 2.2. Funciones de igualación de color y diagramas de cromaticidad. A-B: sistema *CIE 1931 RGB* (los círculos negros muestran la localización de los primarios). C-D: sistema *CIE 1931 XYZ*. A y C: funciones de igualación de color. B y D: diagramas de cromaticidad, mostrando el locus espectral, la línea de los morados (que conecta las coordenadas cromáticas de los extremos del espectro), y la cromaticidad del estímulo equienergético (E). A partir de Wyszecki y Stiles (1982, Figura 3(3.3.3); valores de $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ y $\bar{z}(\lambda)$ tabulados en la Tabla I(3.3.1)). La ecuación matricial que permite pasar del sistema RGB al XYZ es

$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 2,769 & 1,752 & 1,130 \\ 1 & 4,591 & 0,060 \\ 0 & 0,057 & 5,594 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{pmatrix}$$

A partir de los valores triestímulo R , G , y B , se definen las coordenadas cromáticas

$$\begin{aligned} r &= \frac{R}{R + G + B} \\ g &= \frac{G}{R + G + B} \\ b &= \frac{B}{R + G + B} \end{aligned} \quad (13)$$

siendo obvio que $r + g + b = 1$, por lo cual es habitual indicar únicamente dos coordenadas para especificar la cromaticidad de un color. Si se representa la coordenada g en función de la coordenada r , se obtiene el diagrama de cromaticidad *CIE rg*, representado en la Figura 2.2B. De (11) se desprende que las coordenadas cromáticas del estímulo equienergético E son $r_E = g_E = \frac{1}{3}$. Las coordenadas de cromaticidad de los estímulos espectrales forman el *locus spectral*.

Un *diagrama de cromaticidad*, que en definitiva no es más que la proyección de un espacio vectorial 3D (en el que un estímulo de color vendría representado por un vector cuyas componentes son sus valores triestímulo) sobre un plano bidimensional, carece de la información referente a la intensidad del estímulo, informando únicamente sobre su cromaticidad (y por tanto, de qué estímulos son metaméricos dado un nivel de luminancia). Una propiedad fundamental de los diagramas de cromaticidad es que la cromaticidad de un estímulo resultado de la mezcla aditiva de otros dos se representa sobre la línea que los une. A modo de ejemplo, la *línea de los morados* une las cromaticidades de los estímulos situados en los extremos del espectro, y representa todos aquellos estímulos resultado de la mezcla aditiva de estos.

Sistema CIE 1931 XYZ

El sistema *XYZ* tiene como primarios los estímulos imaginarios (no realizables físicamente) (\mathbf{X} , \mathbf{Y} , y \mathbf{Z}). Las funciones de igualación de color $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, y $\bar{z}(\lambda)$, representadas en la Figura 2.2C, especifican los valores triestímulo del estímulo equienergético (siendo la potencia radiante = 1 W) para cada longitud de onda del

espectro visible. Como ocurre en el sistema *RGB*, en el sistema *XYZ* los valores triestímulo están ajustados para que se cumpla:

$$\int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \bar{x}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \bar{y}(\lambda) d\lambda = \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (14)$$

Una característica esencial del sistema *XYZ* es que $\bar{y}(\lambda) = V(\lambda)$, lo que implica que, mediante el cómputo de uno de los valores triestímulo, se obtiene directamente una medida de naturaleza fotométrica (véase la sección 1.2.2), concretamente la relacionada con el valor triestímulo *Y*. A modo de ejemplo, la luminancia de un estímulo se puede hacer coincidir con su valor triestímulo *Y*. Efectivamente, a partir de la propiedad de linealidad, se definen los valores triestímulo *X*, *Y*, y *Z*, de un estímulo de radiancia espectral $L_e(\lambda)$ como

$$X = K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad Y = K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad Z = K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} L_e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (15)$$

donde λ_a y λ_b son los límites del espectro visible, $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, y $\bar{z}(\lambda)$ son las funciones de igualación de color, y $K_m = 683 \text{ lm/W}$. Dos estímulos serán metaméricos si $X_1 = X_2$, $Y_1 = Y_2$, y $Z_1 = Z_2$. Los inconvenientes del sistema *RGB* se transforman en ventajas en el sistema *XYZ*, puesto que (1) las funciones de igualación de color no presentan valores negativos, (2) la luminancia de un estímulo es directamente el valor del triestímulo *Y*, y (3) se facilita la construcción de instrumentos colorimétricos (Wyszecki y Stiles, 1982). Las coordenadas cromáticas, *x*, *y*, y *z* quedan definidas como

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned} \quad (16)$$

por lo que $x + y + z = 1$. Si se representa *y* en función de *x*, se obtiene el *diagrama de cromaticidad CIE xy*, representado en la Figura 2.2D.

Diagrama de cromaticidad CIE $u'v'$ 1976

La falta de uniformidad del *espacio de color CIE 1931 XYZ* y del *diagrama de cromaticidad CIE 1931 xy*, llevó a la CIE a definir el *espacio de color CIE 1976 $L^*u^*v^*$* (o simplemente *CIELUV*), que lleva asociado el *diagrama de cromaticidad CIE 1976 $u'v'$* , representado en la Figura 2.3, y que conserva las ventajosas propiedades del antiguo diagrama *xy*, mostrando además un mayor grado de uniformidad (Wyszecki y Stiles, 1982; Hunt, 1995). Las coordenadas cromáticas $u'v'$ se derivan de *xy* mediante las ecuaciones (Hunt, 1995):

$$\begin{aligned} u' &= \frac{4x}{-2x + 12y + 3} \\ v' &= \frac{9y}{-2x + 12y + 3} \end{aligned} \quad (17)$$

En la parte empírica de esta tesis, se empleará esta forma de representación del color. Otros espacios de color aproximadamente uniformes, como el *CIELAB*, no tienen asociado un diagrama de cromaticidad.

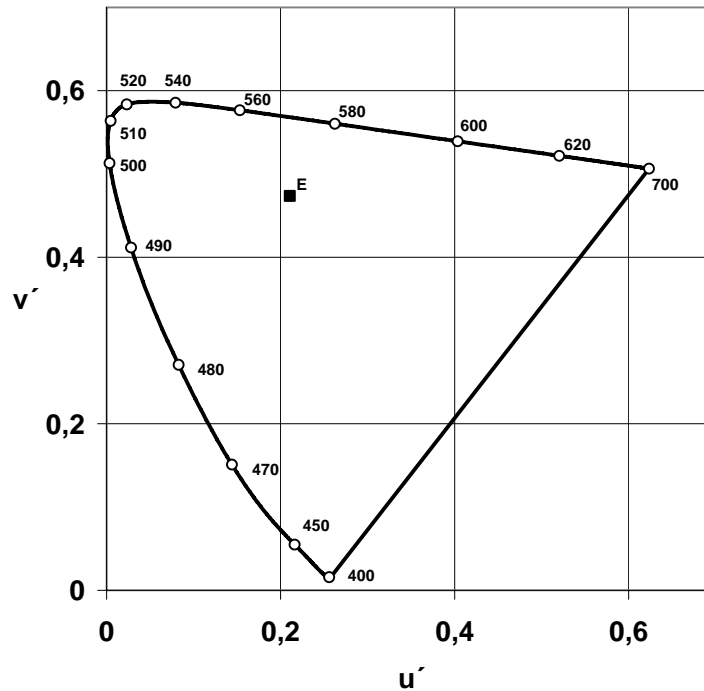


Figura 2.3. Diagrama de cromaticidad CIE 1976 $u'v'$. Se muestra el locus espectral y la línea de los morados, así como el estímulo equienergético *E* (cuadrado negro). Las coordenadas cromáticas $u'v'$ se obtienen a partir de *xy* de acuerdo a las ecuaciones (17).

1.2.6. FUNDAMENTALES DE LOS CONOS

Actualmente se acepta que la *tricromaticidad* deriva de la existencia en la retina humana de tres tipos de conos. Más concretamente, las *funciones de igualación del color* estarían determinadas por las *curvas de sensibilidad espectral* de aquellos, interpretándose que dos estímulos son metaméricos, y por ende tienen los mismos valores triestímulo, porque producen la misma respuesta en los tres tipos de conos presentes en la retina (Smith y Pokorny, 2003).

Determinar con exactitud los *fundamentales de los conos* (nombre bajo el que se conocen entre los estudiosos del color las *curvas de sensibilidad espectral de los conos*) ha sido desde mediados del siglo XIX (véase la sección 1.3.1.2), y continúa siéndolo en las últimas décadas, un cometido esencial dentro del estudio científico de la visión del color. En este contexto, una característica que debe cumplir cualquier terna de curvas espectrales para poder ser considerada como una versión plausible de los fundamentales de los conos, es precisamente poder expresarse como combinación lineal de las funciones de igualación del color. En la sección 1.3.1.3, al presentar un diagrama de cromaticidad basado en la activación relativa de los conos, volveremos más detalladamente sobre este tema.

1.2.7. FILTRADO PRERRETINIANO Y SU INFLUENCIA SOBRE LA DETERMINACIÓN DE FUNCIONES PSICOFÍSICAS

Una vez que atraviesa la pupila, y antes de alcanzar el segmento externo de los fotorreceptores presentes en la retina para ser absorbida por el fotopigmento que estos contienen, desencadenándose el proceso de transducción, la luz debe atravesar diferentes estructuras oculares, como son la *córnea*, el *humor acuoso*, el *cristalino*, y el *humor vítreo*, a los que puede considerarse como una serie de filtros en cascada (Packer y Williams, 2003; Smith y Pokorny, 2003; Wyszecki y Stiles, 1982, sección 2.4.6; Ruddock, 1972). Si bien la córnea, el humor acuoso, y el humor vítreo son casi transparentes (pueden considerarse como filtros neutrales de alta transmitancia), el cristalino es un filtro selectivo.

El estudio de la transmitancia del cristalino, $t(\lambda)$, se ha basado en diferentes técnicas (Norren y Vos, 1974), psicofísicas en algunos casos (como la comparación de la sensibilidad espectral de observadores afáquicos, a los que se les ha extirpado el cristalino, con la de observadores normales), y puramente físicas en otros (como la espectrofotometría realizada a partir de cristalinios extirpados). En 1967 Wyszecki y Stiles (véase Wyszecki y Stiles, 1982) propusieron una función de densidad del cristalino derivada a partir de diferentes investigaciones, y que se representa en la Figura 2.4B (línea continua).

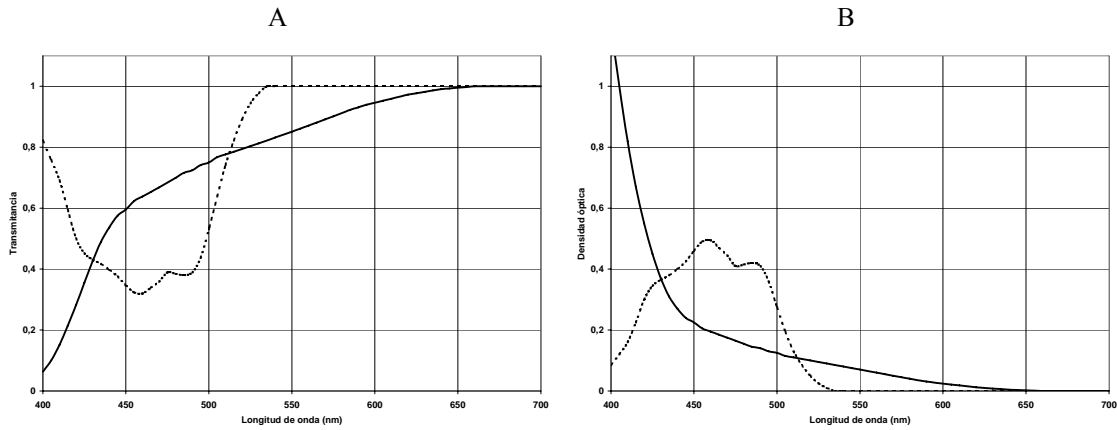


Figura 2.4. Transmitancia espectral y densidad óptica del cristalino y del pigmento macular. A: Funciones de transmitancia espectral del cristalino (línea continua) y del pigmento macular (línea discontinua). Datos tabulados en Wyszecki y Stiles (1982, Tabla II(2.4.6)). B: Densidad espectral del cristalino (línea continua) y del pigmento macular (línea discontinua), calculada a partir de la ecuación (4), que muestra la relación entre transmitancia y densidad. Se calcula que la densidad del cristalino para $\lambda = 400$ nm es aproximadamente 1,2-1,4, y que la del pigmento macular, para $\lambda = 458$ es aproximadamente 0,35-0,5.

Norren y Vos (1974) estimaron, a partir de la *función de eficiencia espectral escotópica*, $V'(\lambda)$, y el espectro de absorción de la rodopsina (el fotorpigmento presente en los bastones), una función estándar de densidad del cristalino, $D(\lambda)$, (estrictamente, corresponde a todos los medios oculares en su conjunto, y no solo al cristalino) que otorgaba valores mayores que la función de compromiso propuesta por Wyszecki y Stiles (1982) para $\lambda < 430$ nm (Norren y Vos, 1974, Tabla 2). Este método se basa en que la sensibilidad a nivel de retina, $S(\lambda)$, está relacionada con la función de sensibilidad espectral, $V(\lambda)$, de la siguiente manera (Ruddock, 1972):

$$S(\lambda) = \frac{K'}{T(\lambda)E(\lambda)} = \frac{K''V(\lambda)}{T(\lambda)} \quad (18)$$

donde $T(\lambda)$ es la transmitancia de los medios oculares, y K' y K'' son constantes multiplicativas (que normalizan las funciones para que su valor máximo sea 1). Esto quiere decir que, en toda determinación psicofísica de la sensibilidad, definida como el recíproco de la energía necesaria para lograr un determinado efecto visual, medida a nivel de córnea, está influyendo el filtrado prerretiniano, cuyo efecto habrá que descontar de las mediciones para que la sensibilidad haga referencia a nivel de retina.

Además, y puesto que existe una amplia variabilidad entre individuos en lo que a la densidad del cristalino se refiere (aproximadamente $\pm 25\%$ de la densidad media para incluir el 95% de los sujetos), Norren y Vos (1974) propusieron un método para derivar la densidad del cristalino $D_i(\lambda)$ de un observador i concreto, a partir de la medición de su sensibilidad espectral escotópica para un par de longitudes de onda para las que el espectro de absorción de la rodopsina, $S(\lambda)$, tenga valores idénticos, por ejemplo 400 y 560 nm, por lo que toda diferencia se deberá al filtrado prerretiniano. Concretamente, puesto que $D(400) - D(565) = 1,39$,

$$D_i(\lambda) = D(\lambda) \frac{X}{1,39} \quad (19)$$

siendo

$$\begin{aligned} X &= \log V'_i(565) - \log V'_i(400) = \log \frac{V'_i(565)}{V'_i(400)} = \\ &= \log \frac{S(565)t_i(565)}{S(400)t_i(400)} = D_i(400) - D_i(565) \end{aligned}$$

La determinación experimental de las *funciones de igualación del color* también se ve influida por la absorción de luz por parte de los medios oculares. De hecho existe un método de normalización, conocido como WDW (en honor a su autor, W. D. Wright), que permite descontar el efecto del filtrado prerretiniano (Smith y Pokorny, 2003; Kaiser y Boynton, 1996; Wyszecki y Stiles, 1982). Se basa en el hecho de que, para estímulos espectrales, un filtro lineal, sea o no selectivo, únicamente reduce el nivel de energía, sin afectar a la cualidad de la estimulación. Algo muy diferente ocurre con estímulos de banda ancha, que al ser filtrados por un filtro selectivo sufren un

cambio en su composición espectral relativa. En tal caso, la influencia de un filtro cuya función de transmitancia sea igual a $T(\lambda)$, sobre los valores triestímulo puede predecirse (Ruddock, 1972) según las ecuaciones

$$\begin{aligned} X &= K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} T(\lambda) L_e(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} T(\lambda) L_e(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z &= K_m \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} T(\lambda) L_e(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (20)$$

Aparte de las estructuras oculares mencionadas, en la parte central de la retina puede encontrarse el *pigmento macular*, cuya función de transmitancia se muestra en la Figura 2.4A (línea discontinua) junto con la del cristalino. La densidad absoluta del pigmento macular cae exponencialmente con la excentricidad retiniana (Smith y Pokorny, 2003) siendo casi inapreciable a partir de los 5°, y muestra una enorme variabilidad entre observadores (tomando valores entre 0 y > 1, para $\lambda_{\max} = 458$ nm). Habitualmente se estima la densidad del pigmento macular de un observador comparando su sensibilidad ante estímulos presentados fovealmente con la sensibilidad ante los mismos estímulos presentados en la parafóvea (Smith y Pokorny, 2003; Wyszecki y Stiles, 1982, sección 2.4.6).

El establecimiento de las funciones de transmitancia espectral del cristalino y del pigmento macular ha tenido un papel de extrema importancia en visión del color, puesto que partir de ellas, mediante la corrección oportuna, es posible estimar la sensibilidad espectral a nivel de retina (véase la ecuación (18)). Es un hecho bien conocido que la densidad del cristalino aumenta con la edad, y, como veremos en la sección 1.3.2.2, diferentes investigadores han tratado de establecer una relación cuantitativa entre ambas variables (Smith, Pokorny y Lutze, 1987; Werner, 1982; Norren y Vos, 1974).

También hay una disminución en la cantidad de luz que llega a la retina debida a procesos de reflexión, pero que son mínimas en comparación con las que se deben al proceso de absorción (se refleja aproximadamente un 3-4% del flujo radiante que llega a

la córnea, independientemente de la longitud de onda). Más importantes tal vez son las consecuencias debidas a los procesos de difusión de la luz, sobre todo cuando interesa tener en cuenta la cantidad de luz en términos absolutos que llega a una determinada zonas de la retina (Wyszecki y Stiles, 1982, sección 2.4.6).

1.2.8. COLORIMETRÍA VS. PERCEPCIÓN DEL COLOR

Antes de dejar atrás este capítulo dedicado a las nociones básicas de la medición de la cantidad y el tipo de luz, es muy importante tener en cuenta que, aunque el objetivo final de todo sistema de colorimetría es derivar unos descriptores colorimétricos de la percepción del color, las transformaciones colorimétricas como las que hemos descrito hasta ahora (por ejemplo la terna de valores triestímulo, o de coordenadas cromáticas y luminancia), no permiten en ningún caso derivar por sí solas la apariencia del color (Kaiser y Boynton, 1996, Capilla et al., 2002).

En el terreno de las categorías de color básicas, este aspecto debe tenerse muy en cuenta cuando se intentan relacionar características psicofísicas de los estímulos (por ejemplo, el volumen colorimétrico que ocupan en un espacio de color estándar) con aspectos asociados a la percepción categórica.

1.3. CAPÍTULO 3: ALTERACIONES DE LA VISIÓN DEL COLOR

En los textos científicos especializados es habitual distinguir entre alteraciones *heredadas* de la visión del color y alteraciones *adquiridas* (Fletcher y Voke, 1985, Birch, 1993). En este capítulo respetaremos esta división, pero haciendo especial hincapié en aquellos tipos de alteración que más relación guardan con esta tesis: daltonismos (denominación común empleada para incluir las alteraciones heredadas de tipo protán y deután; véase Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 10), y alteraciones adquiridas de la visión del color relacionadas con el envejecimiento.

Orígenes del estudio de las deficiencias de la visión del color

A pesar de que hay trabajos previos que dejaron constancia de la existencia de alteraciones en la visión del color (Turberville, 1684, Boyle, 1684, citados en Fletcher y Voke, 1985, p. 134), no se sabe con seguridad si se trataba de alteraciones adquiridas o heredadas. Fue Huddart (1777, citado en el mismo trabajo) quien publicó el que se considera primer registro sobre un caso claro de deficiencias heredadas. Más allá de esta distinción, se considera que la figura de John Dalton (1798, citado en Mollon, 2003, p. 23) tiene un estatus especial en el establecimiento definitivo del estudio analítico de las alteraciones de la visión del color, con descripciones minuciosas basadas en la suya propia y un gran interés en diferentes aspectos del fenómeno, como son su detección, su prevalencia, y su causa. El fenómeno de las deficiencias de la visión del color interesó a pensadores de la talla de Young (quien escogió el caso de Dalton para ejemplificar su explicación sobre las alteraciones de la visión del color) y Helmholtz, como veremos a continuación.

Aunque en ocasiones las alteraciones de la visión del color se engloban bajo el término *ceguera al color* (Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 10), es más correcto el uso de términos como *deficiencia de la visión del color* o *discromatopsia*, habida cuenta de que existen diferentes tipos y grados de severidad de estas alteraciones (Birch, 1993), de las que sólo un pequeño porcentaje implican la pérdida absoluta de discriminación cromática.

1.3.1. ALTERACIONES HEREDADAS DE LA VISIÓN DEL COLOR

Las alteraciones heredadas de la visión del color se pueden clasificar bien sobre la base de criterios funcionales derivados de pruebas psicofísicas o bien en función de los mecanismos subyacentes que presumiblemente son la causa de la alteración (Pokorny y Smith, 1986). Históricamente, los términos empleados para describir estas alteraciones obedecieron al comportamiento exhibido por los observadores en tareas psicofísicas de igualación de color (Kaiser y Boynton, 1996, p. 416; Pokorny y Smith, 1986). Sin embargo, hoy día los mismos términos se emplean para hacer referencia a la alteración o la ausencia de funcionalidad de la clase de fotopigmentos asociada a cada anomalía. En primer lugar haremos una descripción funcional de las deficiencias heredadas de la visión del color, para mencionar después los mecanismos asociados y las alteraciones genéticas causantes.

1.3.1.1. CLASIFICACIÓN FUNCIONAL

El principio de tricromaticidad establece que para un observador con visión normal del color, tres primarios (convenientemente elegidos) son necesarios y suficientes para igualar (metamerizar) el efecto visual que produce cualquier longitud de onda del espectro visible (véase el apartado 1.2.3). Sin embargo, existen observadores que, aún necesitando también tres primarios, los emplean en cantidades distintas a las de un observador normal en una tarea de igualación de color. A estos observadores se los denomina *tricrómatas anómalos* (1.3.1.1)¹. Si el observador no necesita más que dos primarios para igualar cualquier longitud de onda del espectro, se trata de un *dicrómata*. Por último, el *monocrómata* puede realizar esta tarea con el uso de tan solo un primario, sin más que ajustar la intensidad del mismo.

Además existen otros dos criterios funcionales que conjuntamente con el anterior permiten clasificar las afecciones heredadas de la visión del color de forma inequívoca. El primero de ellos es de tipo cualitativo y permite diferenciar entre

¹ El descubrimiento experimental de los tricromatismos anómalos se liga a las investigaciones de Rayleigh (1881, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 138), aunque Seebeck (1837, citado en el mismo lugar) ya demostró la existencia de variaciones cuantitativas en la severidad de las deficiencias.

alteraciones de tipo *protán*, *deután* y *tritán*, dependiendo del tipo de confusiones que tiende a cometer el observador². El segundo criterio, de tipo cuantitativo, obedece al grado o severidad de la alteración, y permite distinguir entre déficits *leves*, *moderados* y *severos*³.

Tabla 3.1. Nomenclatura de los diferentes tipos de alteraciones heredadas de la visión del color.

	Dicrómata	Tricrómata anómalo
Protán	Protanope	Protanómalo
Deután	Deuteranope	Deuteranómalo
Tritán	Tritanope	Tritanómalo*

*: Véase el epígrafe “Prevalencia y distribución”

La Tabla 3.1 muestra la terminología que, tanto en ámbitos científicos como clínicos, es más habitual (Sharpe et al., 1999, p. 25). Esta nomenclatura recoge los aspectos más cualitativos derivados de los diferentes criterios mencionados. En el cuerpo de la tabla pueden observarse seis términos: *protanope*, *protanómalo*, *deuteranope*, *deuteranómalo*, *tritanope* y *tritanómalo*. El prefijo de los términos muestra el tipo de alteración atendiendo a la clase de confusiones asociadas, mientras que el sufijo informa sobre la naturaleza dicromática o tricromática del observador. El sufijo *-anopia* se emplea para indicar la existencia de un dicromatismo (asociado a la ausencia de un tipo de conos) mientras que la existencia de un tritcromatismo anómalo (asociado históricamente a la alteración de un tipo de cono) viene indicado por el sufijo *-anomalía*. Los tricromatismos anómalos muestran un amplio rango de severidad: en un extremo, pueden tener una discriminación cromática muy levemente disminuida; en el otro extremo, dicha discriminación puede estar casi tan reducida como la de un dicrómata. En el apartado siguiente se darán más detalles sobre esta terminología, al ponerla en relación con los fotopigmentos de los conos y los autores que la acuñaron.

² Tanto los tricrómatas anómalos como los dicrómatas se subdividen en estos tres tipos (véase la Tabla 3.1). Los términos *protán*, *deután* y *tritán* fueron adoptados del griego por von Kries (1924, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 138), para clasificar los distintos tipos de observadores con alteraciones en la percepción del color, sobre la suposición de que cada tipo de anomalía estaba asociada a una disfunción de uno de los tres tipos de conos de la retina humana: protoconos (conos L), deuterconos (conos M) y tritaconos (conos S).

³ Por razones de claridad expositiva, de los dos párrafos anteriores podría entenderse que la descripción de cualquier anomalía heredada de la percepción del color debe hacer referencia a ambos tipos de criterio: el referido a la igualación de color por un lado y los dos referidos a la discriminación cromática (cualitativo y cuantitativo) por otro. No obstante, haremos dos aclaraciones. El observador monocrómata carece de discriminación cromática alguna, por lo que, con fines de caracterización de su visión del color, no necesita de criterios diagnósticos extra (consúltese no obstante la Tabla 3.5). En segundo lugar, decir que teóricamente (en principio), y en la práctica clínica, puesto que la cuantía de la alteración está cuantificada según la extensión del rango de confusiones cometidas, el criterio cuantitativo sólo se aplica a los tricrómatas anómalos.

En términos de procesos oponentes (véase el apartado 1.4.1.1), tanto las alteraciones protán como las deután afectan al eje rojo-verde, mientras que las alteraciones tritán afectan al amarillo-azul. El concepto *Daltonismo*, acuñado en honor a John Dalton, hace referencia a las alteraciones en la visión del color heredadas que afectan al mecanismo *rojo-verde*, incluyendo pues los defectos de tipo *protán* y *deután*, independientemente de su severidad. Protanopes, protanómalos, deuteranopes y deuteranómalos son por tanto los cuatro tipos de daltonismo existentes⁴. A continuación ahondaremos en la clasificación de los daltonismos que acabamos de delinear, explotando las bondades de un instrumento, el anomaloscopio, para explicarla más detalladamente.

El anomaloscopio como instrumento diagnóstico para clasificar las alteraciones

El instrumento de diagnóstico que diferencia de forma más fiable entre tricrómatas normales, tricrómatas anómalos, y dicrómatas es el ***anomaloscopio*** (Kaiser y Boynton, 1996). La clave de su valor diagnóstico es que permite: (1) obtener datos críticos acerca de la capacidad de discriminación cromática, y (2) derivar un aspecto fundamental de las funciones de igualación de color así como de la función de eficiencia espectral del observador. Mediante la aplicación de este aparato, que trabaja con estímulos cuasi-monocromáticos⁵, se presenta un campo bipartito circular de unos 2° de ángulo visual que contiene en uno de los semicírculos una luz de 589 nm (percibida como amarilla por un observador con visión normal del color), y una mezcla de dos luces de 545 nm y 670 nm (percibidas como verde y roja respectivamente) en el otro (la Figura 3.1 ilustra esta descripción). La tarea del observador es igualar al máximo la apariencia de los dos semicírculos, logrando por tanto la visión de un campo uniforme en color (tanto en tono como en brillo y saturación). Para conseguirlo, se manipulan tanto las cantidades de los primarios “rojo” y “verde” que componen la mezcla como la intensidad del “amarillo” de referencia. La forma de analizar los resultados derivados de

⁴ El término *Daltonismo*, fue acuñado en 1827, y al IRGCVD (International Research Group on Color Vision Deficiencies) lo mantiene (véase Kaiser y Boynton, 1996, p. 414).

⁵ Existen diferentes tipos de anomaloscopio, y no todos emplean estímulos monocromáticos. Además, los primarios y el estímulo de referencia empleados pueden variar. Aquí sólo describiremos el Modelo I del anomaloscopio de Nagel, que usa estímulos cuasi-monocromáticos de 670 nm y 546 nm como primarios, y un estímulo de 589 nm como estímulo de referencia. El diseño de este aparato se basa en el test de colores espectrales de Rayleigh. Para una breve descripción de diferentes tipos de anomaloscopio y los estímulos empleados en cada uno de ellos, véase Birch (1993, capítulo 7), Fletcher y Voke (1985, capítulo 7), o Pujol (2002).

la aplicación del anomaloscopio proviene del famoso cociente de Rayleigh, que pone en relación dos cantidades, a saber, las intensidades de los primarios rojo y verde (R/V) empleados en la mezcla para metamerizar el amarillo de referencia. Existen dos parámetros de vital importancia a la hora de examinar los resultados obtenidos en el anomaloscopio. Uno de ellos es el punto medio de los ajustes, y el otro, el rango de los mismos (esto es, cuáles son los valores extremos de las intensidades de los primarios cuya mezclas continúa posibilitando la igualación del amarillo).

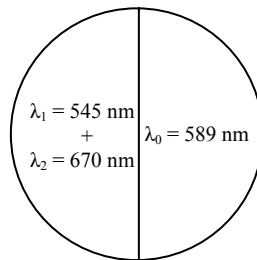


Figura 3.1. Estimulación presentada en un anomaloscopio.

El punto medio y el rango de los ajustes realizados por un observador con visión normal del color se utilizan como criterio para diagnosticar el tipo de daltonismo evaluado. Una característica común a los observadores con anomalías en la percepción del color es su reducida discriminación cromática. En armonía con esta peculiaridad, los *rangos* obtenidos por dichos observadores son típicamente mayores de los que caracterizan a los observadores normales (Figura 3.2). En el extremo, se encuentran los dos tipos de dicrómata daltónico, protanopes y deuteranopes, que aceptan todo el rango de mezclas R/V, de forma que pueden metamerizar la luz de 589 nm (amarillo) con cualquiera de las otras dos (rojo o verde) presentada aisladamente. Estos observadores se diferencian entre sí en su comportamiento en el anomaloscopio debido a sus muy diferentes funciones de sensibilidad espectral (véase la Tabla 3.2), puesto que el “acortamiento del espectro en el extremo rojo” propio de los defectos protán hace que la intensidad del amarillo de 589 nm que ajusta el observador protanope para igualar el rojo de 670 nm sea mucho menor de la que emplea el deuteranope.

Los observadores protanómalos se caracterizan por un *punto medio* del rango (de ratios R/V aceptada) mayor que la de los observadores normales, y además necesitan disminuir la intensidad del amarillo de referencia a medida que la ratio R/V aumenta. El patrón típico de los deuteranómalos es una ratio R/V media menor que la de los

observadores normales y una intensidad del amarillo de referencia muy parecida a la de los observadores normales. La Figura 3.2 muestra esquemáticamente los resultados obtenidos en el anomaloscopio por diferentes observadores con alteraciones en la visión del color. El eje de abscisas muestra la composición de la mezcla de los dos primarios rojo y verde, el de ordenadas, la intensidad ajustada del amarillo de referencia. Puede observarse cómo el rango de ajustes aceptado por los observadores dicrómatas es completo, pero la intensidad ajustada del amarillo es muy diferente para protanopes y deuteranopes. Justo en la intersección de dichos rangos se encuentra el punto medio de los ajustes de los tricrómatas normales (cuyo rango viene representado por el lado mayor del rectángulo que los representa). Nótese cómo los ajustes de protanómalos y deuteranómalos son similares a los de protanopes y deuteranopes, respectivamente, pero exhibiendo un rango menor, y con un punto medio que cae a la derecha del ajuste medio normal en el caso de los protanómalos, y a la izquierda en el caso de los deuteranómalos.

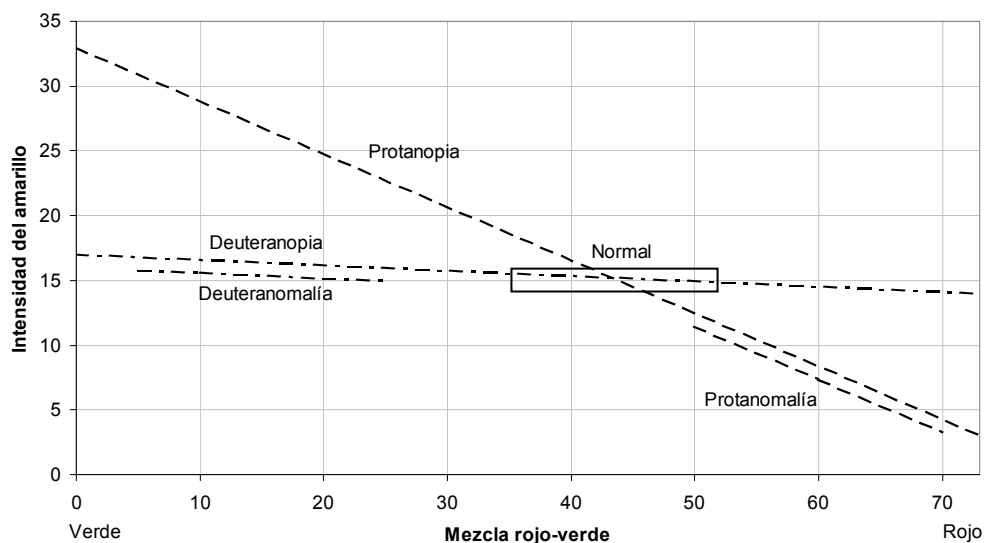


Figura 3.2. Representación esquemática de los ajustes típicos de distintos tipos de observadores en el anomaloscopio. A partir de Fletcher y Voke (1985, Figura 7.40), Birch (1993, Figura 7.9), y Sharpe et al. (1998, Figura 1.11). Los títulos de los ejes mantienen la terminología habitual, pero recuérdese que, estrictamente, los estímulos empleados son luces monocromáticas de 589 nm (“amarillo”), 545 nm (“verde”), y 670 nm (“rojo”).

Características generales de los diferentes tipos de alteraciones

La Tabla 3.2 muestra algunas características de cada tipo de alteración, en relación a tres características psicofísicas: 1) el número de primarios necesarios para igualar las diferentes longitudes de onda del espectro visible, 2) la existencia, y en su caso, localización, de una zona neutral (percibida como acromática) en el espectro, y 3) el máximo de la función de eficiencia espectral. Como ya se comentó al principio de este apartado, la primera característica permite distinguir entre tricrómatas anómalos y dicrómatas (no obstante, véase el apartado *Tricromatismo en observadores dicrómatas ante estímulos de gran tamaño*). La existencia de un *punto neutral* es una característica muy llamativa de los observadores dicrómatas, para los que un estímulo o un pequeño rango de estímulos espectrales, que por definición producen la máxima saturación (para las longitudes de onda dadas) para un observador con visión normal del color, es percibido como un estímulo blanco de referencia⁶.

Tabla 3.2. Principales características de las deficiencias heredadas de la visión del color. Adaptado de Smith y Pokorny (2003). P: Protanope; PA: Protanómalo; D: Deuteranope; DA: Deuteranómalo.

	Normal	Protán	Deután	Tritán
Número de primarios	3	2 (P) 3 (PA)	2 (D) 3 (DA)	2 ó 3
Punto neutral (sólo para dicrómatas)	-	494 nm	499 nm	570 nm
λ_{\max} de la FEE	555 nm	540 nm	560 nm	555 nm

Aunque existe variabilidad entre dicrómatas de un mismo tipo, si se atiende a la media de las distribuciones de ajustes realizados por protanopes, deuteranopes y tritanopes, los valores obtenidos son los que aparecen en la Tabla 3.2. Para un observador protanope, el estímulo espectral que cumple esta propiedad está en torno a los 494 nm, y es percibido como una mezcla entre azul y verde por un observador con visión normal del color. El punto neutral para un deuteranope está en torno a los 499 nm, estímulo un poco más verdoso que el anterior para un observador normal. Por último, el punto neutral para un tritanope se sitúa en los alrededores de los 570 nm, que un observador normal percibe como amarillo verdoso.

⁶ La elección del blanco de referencia determina los ajustes concretos realizados. La Tabla 3.2 muestra los ajustes esperables para el iluminante equienergético. Para iluminantes más fríos, los puntos neutrales se corresponden con longitudes de onda ligeramente menores.

La *función de sensibilidad espectral* de los observadores daltónicos, como promedio, es diferente de la de los observadores con visión normal del color. Los observadores con alteraciones protán son mucho menos sensibles a las longitudes de onda largas, y los observadores con alteraciones deután son menos sensibles a las de onda corta. Este aspecto es especialmente relevante, puesto que pone de manifiesto que existen diferencias más allá de la pura discriminación cromática. La Figura 3.3 muestra las funciones de sensibilidad espectral obtenidas por Pitt (1935, citado en Wyszecki y Stiles, p. 470). Las funciones de los observadores protanómalos son muy parecidas a las de los protanopes, y las de los deuteranómalos a las de los deuteranopes (Fletcher Voke, 1985, sección 3.4.5; Birch, 1993, capítulo 4). La función de sensibilidad espectral de los tritanopes es virtualmente idéntica a las de los observadores con visión normal del color (Kaiser y Boynton, 1996, p. 455).

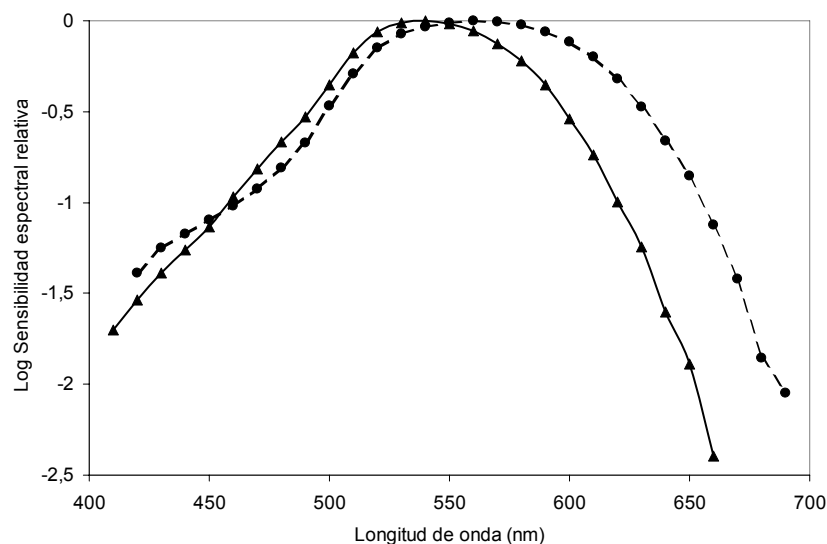


Figura 3.3. Funciones de luminosidad de observadores daltónicos dicrómatas obtenidas por Pitt (1935). La línea continua muestra la media de los ajustes realizados por seis protanopes, la discontinua, la media para seis deuteranopes. El método empleado por Pitt (1935) fue la igualación de brillo. Valores tomados de la Tabla 4(5.14.2) de Wyszecki y Stiles (1982) y transformados a unidades logarítmicas.

Tricromatismo en observadores dicrómatas ante estímulos de gran tamaño

Existe un buen número de investigaciones que demuestran que, ante estímulos cuya proyección excede la zona central de la retina, el comportamiento de muchos dicrómatas pasa a ser, de facto, el propio de un tricrómata anómalo (tres estudios de gran importancia son los de Smith y Pokorny, 1977, Nagy, 1980, y Montag, 1994;

véanse, para más referencias, Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 10; Smith y Pokorny, 2003). Empleando, por ejemplo, estimulaciones de 8°, pocos son los dicrómatas que aceptan el rango completo R/V en un ajuste tipo Rayleigh.

Como causas potencialmente explicativas de este fenómeno, que demuestra una discriminación residual suficiente como para superar la visión dicrómata, se han propuesto, entre otras (Sharpe et al., 1999): la contribución 1) de los bastones, 2) de los conos-C, o 3) de un tercer fotopigmento presente en pequeñas cantidades en la retina de los dicrómatas; 4) las diferencias en la densidad óptica entre los conos de la fovea y de la periferia, 5) la variación (inhomogeneidad) espacial del pigmento macular, 6) los cambios en la geometría y en la orientación de los conos receptores con la excentricidad, y 7) la existencia de diferencias estructurales en los conos más allá del fotopigmento que contienen. Lejos de estar resuelta esta cuestión, en un estudio realizado por Crognale, Teller, Yamaguchi, Motulsky y Deeb (1999), se asevera que las causas de este fenómeno siguen sin estar científicamente establecidas. Es importante recordar, pues, que la clasificación de la Tabla 3.1, que sí está científicamente establecida, se refiere a (1) pruebas psicofísicas, (2) realizadas con un tamaño estimular de 2°, y (3) en condiciones fotópicas (Smith y Pokorny, 2003).

Prevalencia y distribución

En las páginas anteriores, las características más notables de las deficiencias heredadas de la visión del color han quedado brevemente expuestas. Pero, ¿a cuánta gente afectan estas deficiencias? La Tabla 3.3 recoge la *prevalencia* de las diferentes anomalías heredadas de la visión de color, destacando la importancia de dos aspectos. Como puede observarse, los daltonismos son las alteraciones más habituales, afectando a más del 8% de la población. Además, la prevalencia del daltonismo es mucho mayor en hombres (8%) que en mujeres (en torno al 0,4%), de manera que 1 de cada 12 hombres aproximadamente es daltónico mientras que sólo 1 de cada 200 mujeres comparte esta condición. Esto se debe a que la herencia de este tipo de afecciones está ligada al cromosoma X, como veremos en breve. Como contrapartida, los defectos tritán, por transmitirse ligados a herencia autosómica, son tan (escasamente) frecuentes en hombres como en mujeres. Dentro de los daltonismos, los defectos tipo deután suponen la alteración más frecuente, afectando casi al 6% de los varones y a algo más

del 0,35% de las mujeres, siendo la deuteranomalía, sin lugar a dudas, el tipo de daltonismo más frecuente al afectar al 5% de los varones y cerca del 0,35% de las mujeres, mientras que la deuteranopia afecta al 1% de los hombres y a 1 de cada 10000 mujeres. La prevalencia de los defectos protán está cifrada en algo más del 2% para los varones y en torno al 0,05% para las mujeres, siendo algo más frecuente la protanomalía que la protanopia.

Tabla 3.3. Porcentaje de prevalencia de las deficiencias heredadas de la visión del color.

	Fuente: Wyszecski y Stiles (1982). Tabla I(5.14.2)		Fuente: Fletcher y Voke (1985). Tabla 3.1		Fuente: Birch (1993). Tabla 5.2		Fuente: Sharpe et al., (1999). Tabla 1.6	
	H	M	H	M	H	M	H	M
Protanopia	1,0	0,02	1,0	0,02	1	0,01	1,01	0,02
Protanomalía	1,0	0,02	1,5	0,03	1	0,03	1,08	0,03
Deuteranopia	1,1	0,01	1,0	0,01	1	0,01	1,27	0,01
Deuteranomalía	4,9	0,38	5,0	0,40	5	0,035	4,63	0,36
Daltonismos (Σ)	8,0	0,43	8,5	0,46	8	0,40	7,99	0,42
Tritanopia	0,002	0,001	Muy pequeña		< 0,01		0,002-0,008	
Tritanomalía	-	-	Muy pequeña		No hay datos disp.		Exist. no demost.	

H: Hombres, M: mujeres. Los caracteres en cursiva indican datos obtenidos de las fuentes indicadas pero no de las tablas concretas que se indican.

El tercer tipo de dicromatismo, la tritanopia, se transmite como un rasgo autosómico dominante y que por tanto afecta por igual a ambos sexos. A pesar de ser una alteración de muy baja prevalencia (1 persona de cada 13.000-50.000), su existencia está claramente establecida (Wright, 1952). Mucho más controvertida es la existencia de la tritanomalía como defecto heredado de la visión del color, así como el uso del término tritanómalo, aspecto sobre el cual no existe un documento científico concluyente (Sharpe et al., 1999)⁷. Infiriendo a partir de las divisiones de los defectos protán y deután se suponía que existiría una división análoga para los defectos tritán. Pero de hecho, los defectos tritán, aunque en algunos textos vienen claramente divididos en tritanopia y tritanomalía (Fletcher y Voke, 1985, capítulo 3; Birch, 1993, capítulo 4), en otros textos, a pesar de que los autores reconocen su división en dicromatismo y tricromatismo anómalo, cuestionan el uso del término tritanómalo (Pokorny y Smith 1986; Smith y Pokorny, 2003; Sharpe et al., 1999). No obstante, la posibilidad de que

⁷ Según estos autores, puesto que la tritanopia puede mostrarse en diferente grado, hecho que justifica la distinción entre *tritanopia completa* e *incompleta* (la manifestación incompleta es algo común en muchos desórdenes autosómicos dominantes, aspecto que se conoce con el nombre de “penetrancia”), y debido a la dificultad asociada al diagnóstico, las tritanomalías recogidas en la literatura serían errores debidos probablemente a confusiones con *tritanopias incompletas*. (Sharpe et al., 1999, p. 45).

pueda existir la tritanomalía heredada no está completamente descartada (Sharpe et al., 1999).

La Tabla 3.4 ilustra un aspecto de las deficiencias heredadas de la visión del color que matiza los datos recogidos en la Tabla 3.3, y es que su prevalencia no es constante para todos los grupos raciales dentro del género humano. Entre los caucásicos la prevalencia es sin duda mayor que para cualquier otra raza (para una discusión sobre este aspecto, véase Fletcher y Voke, 1985, sección 3.6).

Tabla 3.4. Distribución de las deficiencias heredadas de la visión del color en el género humano. Tomado de Sharpe et al. (1999, Tabla 1.5).

	Hombres		Mujeres	
	N	Prevalencia	N	Prevalencia
Caucásicos	250.281	7,40	40.080	0,50
Asiáticos	349.185	4,17	231.208	0,58
Africanos	3.874	2,61	1.287	0,54
Aborígenes australianos	4.455	1,98	3.201	0,03
Indios americanos	1.548	1,94	1.420	0,63
Isleños del Sur del Pacífico	608	0,82	-	-

Monocromatismos

Los *monocromatismos* son las afecciones de la visión del color más graves, y su prevalencia es muy escasa. Un observador monocrómata es aquél que, empleando únicamente un primario, es capaz de igualar cualquier longitud de onda del espectro. Por este motivo, son los únicos para los que se podría utilizarse con propiedad la expresión de “ciegos al color” (Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 10). Los monocromatismos se dividen en dos grandes categorías: Aquellos que sólo conservan funcionalidad en los bastones de su retina, y aquellos que conservan algún tipo de cono. La Tabla 3.5 recoge algunas de las características más importantes de estas afecciones.

Tabla 3.5. Tipos de Monocromatismos. Información recopilada a partir de los trabajos de Sharpe et al. (1999) y Kaiser y Boynton (1996, capítulo 10).

	Tipo de monocromatismo		
	Con sólo conos C	Con sólo conos L ó M	Sólo con bastones
Sinónimos	<p>“Monocromatismo con solo conos azules”</p> <p>“Acromatopsia incompleta ligada al cromosoma X”</p>	<p>“Acromatopsia completa con agudeza visual normal”</p>	<p>“Acromatopsia típica”</p> <p>“Acromatopsia completa”</p> <p>“Acromatopsia completa con agudeza visual reducida”</p> <p>“Ceguera total al color”</p> <p>“Ceguera diurna”</p>
Características	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción severa de la AV • Nistagmo infantil • Ausencia de fotofobia • Pequeño escotoma central • Fijación no foveal • Fondo de retina normal <p>• Función de sensibilidad espectral esencialmente igual a la de los conos C ($\lambda_{\max} = 440 \text{ nm}$)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espectro acromático • Discriminación cromática residual a nivel mesópico <p>• Herencia ligada al sexo</p>	<ul style="list-style-type: none"> • AV normal • Ausencia de nistagmos • Ausencia de fotofobia • Ausencia de escotoma central <p>• Función de sensibilidad espectral esencialmente igual a la de los conos M o a la del conos L</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espectro acromático <p>• Herencia: no establecida</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Reducción severa de la AV • Nistagmos • Fotofobia • Escotoma central <p>• Función de sensibilidad espectral escotópica ($\lambda_{\max} = 507 \text{ nm}$)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Espectro acromático <p>• Herencia autosómica (rasgo recesivo)</p>
Prevalencia*	<p>H: 1:100.000</p> <p>M: 1:10.000.0000.000</p>	<p>Entre 1:100.000.000 y 1:1.000.000</p>	<p>Entre 1:10.000 y 1:100.000</p>

AV: Agudeza visual.

*: en la mayoría de los casos se trata de estimaciones a partir de diferentes supuestos genéticos.

Dicrómatas unilaterales

Un dicrómata unilateral es aquel observador que, siendo funcionalmente dicrómata de un ojo, conserva la visión normal del color en el otro (Fletcher y Voke, 1985, sección 3.8; Kaiser y Boynton, 1996, p. 453; Sharpe et al., 1999, p. 29). Más allá de la rareza de este fenómeno, nunca se ha demostrado de forma rotunda que el ojo normal lo sea verdaderamente por completo, y su naturaleza se desconoce (Sharpe et al., 1999).

Como veremos en el apartado 1.3.1.4, estos observadores han gozado de un interés especial en la ciencia del color, puesto que, sobre la base de ciertos supuestos, han permitido elaborar modelos de percepción del color en dicrómatas con el objetivo de simularla, de manera que un observador tricrómata normal pueda experimentar los mismos colores que un dicrómata ante cualquier escena.

1.3.1.2. RELACIÓN CON LOS FOTOPIGMENTOS DE LOS CONOS

En el apartado precedente se ha abordado la caracterización de las deficiencias heredadas de la percepción del color desde un punto de vista funcional. Sin pretender ser exhaustivos, en este apartado se expondrá el vínculo entre dichas alteraciones y las anomalías de los fotopigmentos de los conos, sin olvidar la importancia que la genética molecular está demostrando tener en el estudio de esta relación.

Es algo habitual que en ciencia, el estudio de un fenómeno se lleve a cabo desde muy diferentes perspectivas. La ciencia del color, lejos de ser una excepción a esta realidad, es un claro exponente, cabiendo destacar disciplinas tan variadas como la física, la química, la fisiología, la psicología, o la etología, como artífices de su desarrollo, entre otras (Backhaus, Kliegl y Werner, 1998). Es de justicia destacar que en el estudio del color, habitualmente, la psicofísica demuestra la existencia de determinados fenómenos visuales para los cuales solamente después se encuentra una base fisiológica. Un claro ejemplo es el que nos atañe en este apartado: el nexo entre las alteraciones funcionales de la percepción del color y las anomalías de los fotorreceptores visuales.

Fotopigmentos de los conos y deficiencias heredadas de la visión del color

Desde el descubrimiento de las alteraciones de la visión del color, estas se intentaron explicar a partir de las teorías existentes. Palmer (1777, citado en Mollon, 2003, p. 10, Kaiser y Boynton, 1996, p. 20), fue un pionero al achacar las deficiencias de la visión del color a problemas existentes en un tipo (o más) de los tres “receptores” retinianos. Young (1807, citado en Mollon, 2003, p. 24), igualmente se basó en la teoría tricromática que defendía para explicar la alteración de Dalton, achacándola a la ausencia o parálisis de un tipo de receptor.

Pero no fue hasta mediados de siglo XIX cuando Maxwell (1855, citado en Mollon, 2003, p. 29) propuso un método para inferir las cromaticidades de los fundamentales de los conos a partir de datos empíricos provenientes de las funciones de igualación de color de observadores normales y de observadores dicrómatas (véase el apartado siguiente). Su propuesta implicaba, a nivel conceptual, el uso de colores

imaginarios por una parte, y suponer, por otra parte, que los dicrómatas carecen de un tipo de cono y que además sus dos restantes son idénticos a los de un observador tricrómatas normal. Con estos supuestos, es posible derivar los fundamentales de los conos a partir de una transformación lineal de las funciones de igualación de color y con ayuda de la cromaticidad de los puntos de confusión de los dicrómatas (Wyszecki y Stiles, 1982, sección 8.2.5; Pokorny y Smith, 1986, sección 5.1.1). Helmholtz (1866, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 158) también definió la “ceguera al color” como una versión o sistema reducido de la visión tricromática, en el que la funcionalidad de uno de los fotorreceptores está ausente.

Köning y Dieterici (1886; 1892, citado en Mollon, 2003, p. 31, Wright, 1996, p. 535), habiendo estimado en primer lugar las funciones de igualación de color en observadores normales, protanopes, y deuteranopes⁸, propusieron las primeras estimaciones plausibles de los fundamentales de los conos basándose en el método ideado por Maxwell. En reconocimiento, las sensibilidades espectrales derivadas según el método propuesto por Maxwell y adoptado por Köning se conocen como fundamentales de Köning (Smith y Pokorny, 2003, p. 117). De la misma manera, la hipótesis de que los dicrómatas carecen de un tipo de fotorreceptor se conoce como *hipótesis de la pérdida*, *hipótesis de la reducción* o *hipótesis de Köning* (véase el epígrafe titulado *Codificación genética de los opsinas y sensibilidad espectral de los fopigmentos de los conos*).

Mediante técnicas más directas (entendidas como aquellas en las que no media la respuesta comportamental del observador, al contrario de lo que sucede en psicofísica, véase Kaiser y Boynton, 1996, p. 145), los trabajos realizados mediante la densitometría retiniana vinieron a avalar la hipótesis de la reducción. Rushton, en una serie de experimentos, y trabajando con observadores normales, protanopes y deuteranopes (véase Fletcher y Voke, 1985, sección 3.3.2), demostró la ausencia de fopigmento L (que él denominó *erythrolabe*) en protanopes (Rushton, 1963, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 149), y la ausencia de fopigmento M (al cual denominó *chlorolabe*) en deuteranopes (Rushton, 1965, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 149). Los resultados de Rushton, empleando técnicas directas en observadores dicrómatas,

⁸ Wright (1952) realizó un estudio extensivo con tritanopes.

son análogos a los obtenidos mediante métodos psicofísicos. Por ejemplo, Mitchell y Rushton (1971) compararon los resultados derivados de la densitometría retiniana con los datos psicofísicos publicados previamente por Pitt (1935) (véase la Figura 3.3), obteniendo un gran ajuste.

En el caso de los *tricromatismos anómalos*, estudiados sistemáticamente por Rayleigh, la causa del fenómeno ha sido mucho más discutida. Una de las hipótesis propuesta (defendida por ejemplo por von Kries) ha sido la *hipótesis de la alteración* de uno o varios de los fotopigmentos (Wyszecki y Stiles, 1982, p. 462), que defiende que la causa de las anomalías es la existencia de un pigmento anómalo, esto es, diferente de los que se dan en las retinas de observadores normales. Pero a raíz del patrón de resultados empíricos obtenidos en el anomaloscopio con observadores anómalos, algunos autores dedujeron que la explicación de las anomalías a nivel de receptores era insuficiente, puesto que no predecía el comportamiento exhibido por protanómalos y deuteranómalos. Por ejemplo, partiendo de la base de que en la deuteranomalía se conserva el fotopigmento L normal y la curva espectral del fotopigmento M está desplazada hacia longitudes de onda largas, lo que se conoce como *hipótesis de la proximidad espectral*, se predeciría que, a consecuencia de un mayor desplazamiento, deberían producirse dos resultados indisolubles en el anomaloscopio: 1) un punto medio de ajustes con una ratio R/V progresivamente menor (la longitud de onda del primario verde es cada vez menos eficiente) y 2) un rango mayor (puesto que el incremento en el solapamiento de las curvas de sensibilidad espectral de los fotopigmentos L y M reduciría la discriminación cromática). Experimentalmente, sin embargo, los estudios muestran una disociación de estos dos aspectos, de manera que ciertos observadores anómalos pueden mostrar un rango extenso, característico de una discriminación debilitada, pero a la vez este rango puede estar centrado en torno a un punto más cercano al ajuste medio normal que otros observadores anómalos que muestran un rango menor.

Por esta razón, en el marco de la teoría de los procesos oponentes se apuntó a un mecanismo post-receptivo para dar cuenta de este hecho. Basándose en que existen dos tipos de variaciones con respecto a la norma, el punto medio del rango y la extensión del mismo, y estas son independientes y pueden ocurrir en diverso grado, Hurvich (1981, capítulo 16) propone dos mecanismos diferentes para explicarlos: 1) El cambio o

desplazamiento de los máximos de respuesta de las funciones de sensibilidad de los fotopigmentos, que afecta al punto medio del ajuste, y 2) La reducción de la eficiencia del sistema cromático R/V, que afecta a la desviación típica del ajuste. Sin embargo, como se expondrá a continuación, con los conocimientos que se poseen hoy día parece innecesario este tipo de explicaciones post-receptivas.

Tipos de alteraciones heredadas de la visión del color: clasificación según el mecanismo subyacente

En el apartado anterior se describió la *clasificación* funcional de las alteraciones heredadas de la visión del color, indicando que dicha taxonomía también se realiza en función del mecanismo subyacente que hipotéticamente causa la deficiencia. Von Kries (1897, citado en Pokorny y Smith, 1986, sección 6.1.2), a partir de las propiedades de la igualación de color de observadores con alteraciones, diferenció entre tres posibles tipos de mecanismo: 1) *absorción*, 2) *alteración* y 3) *reducción*. El primero se refiere a diferencias en la absorción pre-retiniana⁹. El segundo, a la anomalía o cambio en el espectro de absorción de uno o más fotopigmentos. Y, por último, el mecanismo de reducción implica que el observador afectado, además de muchos otros, acepta los ajustes realizados por el observador normal. A su vez, se distinguen dos clases de mecanismo de reducción según la causa fisiológica concreta: a) mecanismo de reducción del tipo Köning, según el cual uno de los conos no es funcional (normalmente se sitúa a nivel de fotopigmentos), y b) mecanismo de reducción del tipo Leber-Fick (o Aitken-Leber-Fick), que normalmente se sitúa a nivel post-receptivo. Von Kries (1897, véase Smith y Pokorny, 2003, p. 139) aplicó la hipótesis de la reducción para explicar la visión dicrómata, y la hipótesis de la alteración para la visión anómala.

Con lo dicho en los párrafos anteriores, ahora es más sencillo explicar detalladamente el origen y el significado de la terminología introducida en el apartado anterior. Los términos de tricrómata normal, tricrómata anómalo y dicrómata describen el comportamiento exhibido en experimentos de mezcla de color (Wyszecki y Stiles,

⁹ El propio Dalton creía, erróneamente, que la causa de su alteración se debía a un factor de este tipo. Concretamente, pensaba que en el interior de su globo ocular, concretamente en el humor vítreo, había un pigmento azulado que actuaba como filtro, impidiendo la transmitancia de las longitudes de onda largas (véase Fletcher y Voke, 1985, p. 136; Kaiser y Boynton, 1996, p. 415; Mollon, 2003, p. 23). El propio Dalton ordenó que esta hipótesis se comprobara a su muerte, pero los resultados no la avalaron, puesto que se encontró que el ojo sometido a análisis era perfectamente normal.

1982, sección 5. 14). Los prefijos *prot-*, *deut-* y *trit-* provienen del griego (*protos*: primero, *deuteros*: segundo y *tritros*: tercero) y se emplean para referirse a alteraciones de los fotopigmentos de los conos L, M y S, respectivamente (Sharpe et al., 1999). Nagel (1904, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 141) utilizó los términos protanomalía y deuteranomalía para distinguir entre los dos tipos de observadores descubiertos por Rayleigh (1881), que a su vez habían sido previamente denominados tricrómatas anómalos por Köning y Dieterici (1886, citado en Mollon, 2003 p. 31) Por último, los términos protanopia, deuteranopia, y tritanopia fueron introducidos por von Kries (1924, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 138; el sufijo *-anopia* indica “ausencia de”).

Después de más de dos siglos de investigación desde que en los albores de la teoría tricromática se hiciera explícita la primera conjetura sobre la causa de las deficiencias de la visión del color (Palmer, 1777), hoy día se asocian los dicromatismos a la ausencia de uno de los tres tipos de fotopigmento, y las anomalías (deuteranomalías y protanomalías) han pasado de asociarse al desplazamiento de la curva espectral de un tipo de fotopigmento a interpretarse como la ausencia de un tipo de fotopigmento en combinación con la presencia de dos expresiones distintas del fotopigmento restante (véase el apartado de genética). Concretamente, los protanopes carecen del fotopigmento L, los deuteranopes del fotopigmento M, y en la tritanopia el fotopigmento ausente es el C (Kaiser y Boynton, 1996; Sharpe et al., 1999; Smith y Pokorny, 2003)¹⁰. Esto deja al observador dicrómata con únicamente dos tipos de conos en la parte central de su retina. Por su parte, un protanómalo carecería del fotopigmento L y tendría un pigmento M normal y otro híbrido, y un deuteranómalo carecería del fotopigmento M, teniendo un pigmento L híbrido además del normal (Smith y Pokorny, 2003).

¹⁰ Aunque a veces en la literatura especializada se usan de forma intercambiable las expresiones 1) “ausencia” de conos L, M o S y 2) “ausencia” de fotopigmento L, M o S, la segunda es con mucho preferible. La razón es que muy probablemente la principal diferencia entre los conos sea el fotopigmento que contienen (Kaiser y Boynton, 1996; Sharpe et al. 1999), y en última instancia este es el que determina la sensibilidad espectral del fotorreceptor.

Codificación genética de las opsinas y sensibilidad espectral de los fotorreceptores de los conos

Tan sólo un año después de que Huddart (1777, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 135) recogiera el hecho de que dos hermanos padecían deficiencias en la visión del color, Lort (1778 citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 135) publicó el primer árbol genealógico reconocido que ilustra la distribución de las alteraciones a lo largo de tres generaciones de una misma familia. Aunque ya existían sospechas sobre la heredabilidad de este rasgo, no fue hasta la publicación de este tipo de trabajos cuando el modo en el que se heredaban los daltonismos empezó a quedar establecido. Concretamente, observando de forma conjunta los árboles genealógicos publicados por Lort (véase la Figura 5.1 de Birch, 1993, para una reproducción) y Horner (reproducido en la Figura 10.16 de Kaiser y Boynton, 1996), se aprecian con claridad dos características intrínsecas al modo de herencia (obsérvese la Figura 3.4): 1) la alteración es *mucho más frecuente en hombres*, y 2) *salta de una generación a otra* antes de volver a manifestarse, a no ser que haya una mujer afectada (o portadora). Las piezas del puzzle estaban a la espera de que alguien las uniera, marcando así un hito en la historia de la genética. Tanto es así que Sharpe et al. (1999) nos recuerdan que:

“La localización en el cromosoma X de los gen(es) responsables de la ceguera al color del tipo rojo-verde señalada por Wilson se toma a menudo como el evento que marca el comienzo del mapa del genoma humano”. (p. 25).

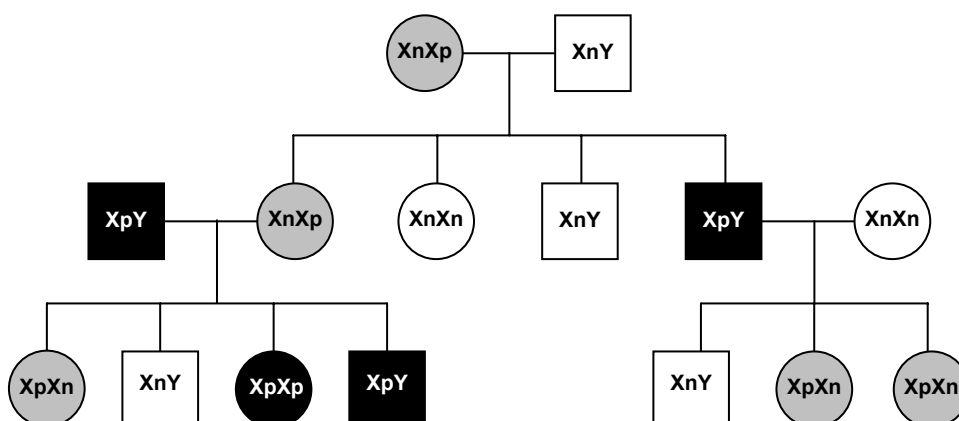


Figura 3.4. Árbol genealógico que ilustra el modo de herencia de las alteraciones de la visión del color ligadas al cromosoma X. Tomado de la Figura 5.1 de Neitz y Neitz (1998). Círculos: mujeres, cuadrados: hombres. El color negro muestra la manifestación de la alteración, el gris señala a las mujeres portadoras de la afección.

Sin embargo, ni la localización exacta de los genes responsables ni los mecanismos subyacentes estaban establecidos (consúltase por ejemplo Fletcher y Voke, 1985, sección 3.7; Pokorny y Smith, 1986) hasta que en tiempos mucho más recientes, concretamente, en 1986, se publicaron en *Science* dos trabajos de suma importancia sobre la genética molecular relacionada con la visión del color. Hasta la fecha, los avances en este campo han sido considerables, pero aún quedan muchas incógnitas por desvelar.

Tal y como auguraba Hurvich (1981, capítulo 19), se necesitaba más estudio a nivel genético para determinar los mecanismos asociados con 1) el *desplazamiento* de las funciones de absorción de los conos, supuestamente subyacente a los tricromatismos anómalos, 2) la *pérdida* de un tipo de fotopigmento, supuesta causa de los dicromatismos, y 3) el grado de pérdida *neural* asociado, según él, a ciertas alteraciones. Como veremos, los dos primeros factores han sido confirmados, pero es muy dudoso que el tercer tipo de factor tenga ningún papel. Sin querer ser exhaustivos en este tema, haremos un breve resumen sobre parte de los conocimientos que la genética molecular ha aportado a este campo y que resultan de interés para entender ciertos aspectos de las alteraciones de la visión del color (Neitz y Neitz, 1998, Sharpe et al., 1999).

Uno de los hechos más notables, que ha supuesto un hallazgo sorprendente y que dota de una continuidad histórica incontestable al estudio de las alteraciones de la visión del color, ha sido el establecimiento de que, en contra de la idea hasta hace poco tiempo vigente de que Dalton era protanope (p. ej., Fletcher y Voke, 1985, Birch, 1993), la alteración que verdaderamente padecía era la deuteranopia. Ciertamente, hoy día la comunidad científica asume que Dalton era deuteranope, tal y como se recoge en los manuales actuales relacionados con la percepción del color (Kaiser y Boynton, 1996, Sharpe et al., 1999, Mollon, 2003), y este descubrimiento sólo ha sido posible gracias a un análisis genético de parte del tejido ocular de Dalton que aún se conservaba (Hunt, Dulai, Bowmaker y Mollon, 1995).

Localización y estructura de los genes que codifican las opsinas de los conos

El trabajo de Sharpe et al. (1999) ofrece una magnífica introducción sobre este tema. Los fotopigmentos que están presentes en los fotorreceptores de la retina son la unión de una cromófora (el 11-cis retinal) y una opsina. La opsina es una proteína cuya secuencia de aminoácidos (AA) viene codificada en ciertos genes que se encuentran localizados en partes concretas (loci) de los cromosomas que contienen el ADN: 1) en el brazo q del cromosoma X en el caso de los fotopigmentos L y M, 2) en el brazo q del cromosoma 7 en el caso del fotopigmento C y 3) en brazo q del cromosoma 3 en el caso de la rodopsina. De la interacción de la opsina y el 11-cis retinal se derivan las características espectrales del fotopigmento. La genética molecular ha mostrado que ciertas sustituciones en la cadena de AA pueden cambiar estas características.

Los genes de las opsinas de los fotopigmentos visuales están divididos en tres partes: 1) promotora (que regula el proceso de transcripción, y por ende la cantidad de expresión del gen), 2) intrones, y 3) exones, en los que la secuencia de nucleótidos que codifica la información sobre la opsina se agrupa en tripletes de bases denominados codones. El gen que codifica el pigmento C consta de 5 exones y los que codifican los pigmentos L y M, de 6.

Daltonismos (defectos protán y deután)

Los defectos protán y deután se heredan como alteraciones ligadas al cromosoma X, y por tanto al sexo (véase el apartado sobre prevalencia), precisamente porque los genes que codifican las opsinas de los fotopigmentos L y M se encuentran en el cromosoma X, y las alteraciones se heredan como rasgos recesivos. Puesto que una mujer tiene dos cromosomas X, es mucho menos probable que manifieste la alteración¹¹.

De los 364 codones que componen los 6 exones que contienen los genes de los fotopigmentos L y M, se ha demostrado que sólo 15 marcan la diferencia entre el fotopigmento L y el M. Además, se ha demostrado que ciertas sustituciones en la

¹¹ Aún así, existen numerosas pruebas que demuestran que las mujeres portadoras de alteraciones protán o deután muestran ciertos signos propios de dichas alteraciones.

cadena de aminoácidos en los exones 2, 3, 4 y 5 de los genes causan un cambio en la función de absorción de los fotopigmentos. La Tabla 3.6 resume a grandes rasgos este aspecto, indicando en la segunda columna el número del codón concreto en el que se produce la sustitución responsable del cambio de AA en la opsina, y los desplazamientos más destacables en el máximo de la curva de absorción asociados a la sustitución (entre paréntesis). Como puede observarse, las sustituciones en el exón 5 son las que producen un cambio más acusado en λ_{\max} . De hecho, para los genetistas, la secuencia de bases de este exón define si un fotopigmento es L o M.

Tabla 3.6. Diferencias entre los genes que codifican las opsinas de los fotopigmentos humanos L y M. En negrita se muestran los codones que se ha demostrado pueden producir un cambio en la curva de absorción del fotopigmento, y entre paréntesis una estimación de la magnitud de dichos cambios.

Exón	Codón (y cambio asociado en λ_{\max})
2	65, 111, 116
3	153, 180 (-4 nm)
4	230, 233, 236
5	274, 275, 277 (-7 nm), 279, 285 (-14 nm), 298, 309

La nomenclatura empleada para identificar la secuencia de los genes que codifican los las opsinas de los fotopigmentos L y M sigue las reglas que se indican a continuación (Sharpe et al., 1999):

1. En primer lugar se indica la clase de fotopigmento, que puede ser normal (L o M) o híbrido. La secuencia genética de los pigmentos híbridos, producidos durante el proceso de meiosis por una recombinación o sobrecruzamiento desigual, contiene secuencias propias de ambos tipos de genes (L y M), y el punto en el que se da el sobrecruzamiento se indica de la siguiente manera: en primer lugar se indica el número de exones pertenecientes a un gen, y a continuación el número de exón a partir del cual la secuencia genética es la propia del gen que codifica el otro fotopigmento (por ejemplo, L2M3 identifica un pigmento híbrido cuyos exones 1 y 2 tienen una secuencia propia de un gen que codifica un pigmento L, y cuyos exones 3, 4 y 5 codifican una secuencia propia de un gen que codifica un pigmento M).

2. En segundo lugar, entre paréntesis se indica el AA que ocupa la posición 180 en la opsina, que puede ser alanina (ala¹⁸⁰) o serina (ser¹⁸⁰)¹². Se concede tanta importancia a este AA porque se ha demostrado que, entre la población con visión normal del color, existen dos *polimorfismos* para cada uno de los fotopigmentos L y M. La frecuencia con la que se manifiestan estos alelos es más o menos pareja en el caso del fotopigmento L (56% para L(ser¹⁸⁰), 44% para L(ala¹⁸⁰), aproximadamente), pero tremendamente desigual en el caso del fotopigmento M (94% M(ala¹⁸⁰), 6% M(ser¹⁸⁰), aproximadamente).
3. Por último, los casos en los que un fragmento proveniente del exón 2 de un gen que nominalmente codificaba un pigmento M está inserto en un gen que codifica un pigmento L se indican de la siguiente manera: L(M2).

Tabla 3.7. Máximos de las curvas de absorción de los fotopigmentos humanos M, híbridos M-L, y L. Adaptado de Sharpe et al, (1999), Tabla 1.3.

Genotipo	In vivo	In vitro	
	Sharpe et al. (1998)	Merbs y Nathans (1992a, 1992b)	Asenjo, Rim, y Oprian (1994)
M(ala ¹⁸⁰) = L1M2(ala ¹⁸⁰)	527,8 ± 1,1	529,7 ± 2,0	532 ± 1,0
L2M3(ala ¹⁸⁰)	528,5 ± 0,7	529,5 ± 2,6	532 ± 1,0
L3M4(ser ¹⁸⁰)	531,5 ± 0,8	533,3 ± 1,0	534 ± 1,0
L4M5(ala ¹⁸⁰)	535,4	531,6 ± 1,8	—
L4M5(ser ¹⁸⁰)	534,2	536,0 ± 1,4	538 ± 1,0
M2L3(ala ¹⁸⁰)	—	549,6 ± 0,9	—
M2L3(ser ¹⁸⁰)	—	553,0 ± 1,4	559 ± 1,0
M3L4	—	548,8 ± 1,3	555 ± 1,0
M4L5	—	544,8 ± 1,8	551 ± 1,0
L(ala ¹⁸⁰)	557,9 ± 0,4	552,4 ± 1,1	556 ± 1,0
L(M2, ala ¹⁸⁰)	556,9	—	—
L(M2, ser ¹⁸⁰)	558,5	—	—
L(ser ¹⁸⁰)	560,3 ± 0,3	556,7 ± 2,1	563 ± 1,0

La Tabla 3.7 muestra un resumen de los resultados de diferentes estudios (in vivo e in vitro) sobre la localización del máximo de la curva de absorción del fotopigmento. Los estudios sobre la genética molecular de las opsinas han mostrado las siguientes regularidades (Sharpe et al., 1999):

¹² Por razones de brevedad, en este texto no se detallará el resto de sustituciones (cambios en la cadena de aminoácidos) que se ha demostrado pueden producir cambios en las características espectrales de los fotopigmentos (consúltase Sharpe et al., 1999).

1. En contra de la teoría clásica, no existe *un* fotopigmento normal L y *un* fotopigmento normal M, sino dos *clases* de fotopigmentos normales L y M, cada una de las cuales muestra dos diferentes polimorfismos.
2. Además, existen pigmentos *híbridos*, producto de la fusión de secuencias genéticas típicas de genes que codifican las opsinas de los fotopigmentos M y L normales (véase la Figura 5.7 de Neitz y Neitz, 1998). La secuencia genética del exón 5 es crítica para predecir si la curva de absorción estará localizada hacia longitudes de onda larga (en las proximidades del máximo propio del fotopigmento L) o corta (cerca del máximo de M). Si esto no fuera así, carecería de sentido seguir hablando de L y M como tipos distintos de fotopigmentos. Parece existir una clara correlación entre las proporciones correspondientes a los genes normales (que codifican opsinas de los fotopigmentos L y M) que forman un gen híbrido, y las características espectrales del fotopigmento al que este gen da lugar, de manera que su sintonización espectral estará desplazada hacia longitudes de onda larga cuanto más proporción exista de secuencias típicas del gen que codifica la opsina del fotopigmento L normal, y hacia longitudes de onda corta cuanto más proporción exista de secuencias típicas del gen que codifica la opsina del fotopigmento M normal (véase la Tabla 3.7).
3. Parece ser que la posición de los genes dentro de la secuencia genética que codifica las opsinas es de vital importancia en el mecanismo de expresión de las opsinas, de manera que la probabilidad de expresión es mucho mayor para el gen situado en primer lugar (más cerca de la secuencia promotora), algo menor para el situado en segundo lugar, y prácticamente despreciable para el resto.

Desde el punto de vista de la genética molecular, el mecanismo causante de los *dicromatismos* de tipo protán y deután es, en la gran mayoría de los casos, el sobrecruzamiento homólogo desigual durante el proceso de meiosis que da lugar a la formación del cromosoma X en el gameto femenino (Sharpe et al., 1999)¹³. Las consecuencias de este sobrecruzamiento dependerán de dos factores: 1) el punto concreto en el que se dé, y 2) el número de genes codificadores de opsinas que resulte en la secuencia genética. Cabe distinguir entre dos tipos de sobrecruzamiento o recombinación: intergenético, cuando ocurre en una región entre dos genes, e

¹³ Existen otros desórdenes genéticos mucho menos frecuentes, como las mutaciones puntuales o la supresión de secuencias genéticas de mayor longitud, que pueden causar estas alteraciones.

intragenético, cuando ocurre dentro de un gen. La *deuteranopia*, en algo menos de la mitad de los casos, deriva de una recombinación desigual intergenética en la que el resultado es la reducción de la secuencia genética a un único gen que codifica la opsina propia del fotopigmento L (denominemos este genotipo como D1). En el resto de los casos (D2) esta alteración se deriva de recombinaciones intragenéticas que dan lugar a una secuencia de varios genes en la que el primer gen codifica un pigmento L normal, y el segundo un pigmento L híbrido con características espectrales indistinguibles del primero (M1L2). La *protanopia* deriva de recombinaciones intragenéticas que estrictamente dan lugar a pigmentos M híbridos; en algo menos de la mitad de los casos, esta recombinación resulta en la existencia de un único gen (P1), cuya respuesta espectral puede ser indistinguible de la del fotopigmento M normal (P1a) o diferente (P1b), mientras que en el resto de los casos (P2) existe más de un gen en la secuencia, siendo el primero un pigmento M híbrido cuya curva de respuesta espectral es indistinguible de la del pigmento M normal, y el resto uno o varios genes que codifican un pigmento M normal.

¿Cómo se relacionan estos mecanismos genéticos con la *hipótesis de la reducción* que asegura que la visión del color de los dicrómatas es una versión reducida de la de los tricrómatas? Sharpe et al. (1999) proponen un análisis a nivel genético asegurando que en sentido estricto la hipótesis de la reducción no se cumple para todos los dicrómatas. Según estos autores, dicha hipótesis sólo se cumple estrictamente en aquellos casos en los que en la secuencia genética que codifica las opsinas de los fotopigmentos se cumplen dos criterios: 1) sólo existe un gen, y 2) las características espectrales del fotopigmento del dicrómata son idénticas a las del fotopigmento correspondiente (L o M) de los observadores normales. Concretamente, la hipótesis se cumpliría en los casos de deuteranopia en los que únicamente existe un gen que codifica un fotopigmento L, esto es, los derivados de un proceso de recombinación desigual intergenética, que suponen aproximadamente un 50% de los deuteranopes (D1), y en el caso de la protanopia en aquellos casos en los que el pigmento híbrido tiene unas características espectrales virtualmente idénticas a las del fotopigmento M normal (L1M2 o L2M3) y no existen más genes en la secuencia (P1a), lo cual incluye aproximadamente a un 25% de los protanopes (el resto de protanopes de gen único poseerían un fotopigmento M híbrido cuya respuesta espectral es diferente de la del fotopigmento M normal).

En resumidas cuentas, los protanopes pueden poseer un fotopigmento híbrido cuyas características espectrales sean diferentes de las del fotopigmento M normal, al igual que los deuteranopes pueden poseer uno de los dos fotopigmentos propios de los polimorfismos del fotopigmento L. En principio, esto podría poner en duda la exactitud del método de determinación de los colores confundibles por un dicrómata a describir en el siguiente apartado, que en definitiva se basa en la hipótesis de la reducción pero empleando diagramas de cromaticidad estándar.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, el modelo genético sobre los *tricromatismos anómalos* que se baraja actualmente como más plausible, frente a otras teorías alternativas¹⁴, es el que defiende la presencia de un pigmento anómalo (híbrido) junto con una de las dos variantes polimórficas de los pigmentos de los conos M o L.

Bajo este nuevo esquema, se han reanalizado viejos problemas en el estudio de la visión del color. Por ejemplo, Neitz, Kantz y Neitz (1998) han mostrado la validez de la *hipótesis de la proximidad espectral* para explicar los resultados obtenidos por observadores anómalos en el anomaloscopio (véase el epígrafe titulado *Fotopigmentos de los conos y deficiencias heredadas de la visión del color*). En un famoso estudio publicado en *Science*, estos autores mostraron que *tanto* el punto medio *como* el rango de los ajustes estaban explicados exclusivamente por la separación *relativa* de las curvas de absorción de los dos fotopigmentos presentes en observadores deuteranómalos. Los autores encontraron que este tipo de observadores carecían del fotopigmento M, a la vez que poseían dos poblaciones de fotopigmentos sintonizados en la región de longitudes de onda larga, siendo uno de ellos el fotopigmento L normal y el restante un fotopigmento L híbrido. El tipo de ajustes realizados en el anomaloscopio dependió *no sólo* de la localización del fotopigmento híbrido, sino también de la del fotopigmento L normal, en función del tipo de polimorfismo del que se tratara (L(ser¹⁸⁰) o L(ala¹⁸⁰)). En breve: el punto medio del ajuste dependió de la localización espectral de los fotopigmentos, y el rango dependió del grado de solapamiento de sus curvas de respuesta espectral. Quedaba así explicada la paradoja de que un observador anómalo pudiera realizar un ajuste medio más cercano a la media normal y sin embargo mostrar a

¹⁴ He aquí ejemplos de otras hipótesis: 1) la existencia de un pigmento anómalo común a todos los tricromatismos anómalos, 2) la existencia de un fotopigmento común a todos los protanómalos y otro diferente a todos los deuteranómalos, o 3) la inexistencia de pigmentos anómalos: sólo existen clusters de pigmentos normales.

la vez un rango más extenso que otros observadores anómalos cuyo punto medio estaba más alejado de la media normal.

Según los autores, y en clara alusión a mecanismos post receptivos como los propuestos por Hurvich (1981): *“Este es exactamente el fenómeno que la versión original de la hipótesis de la proximidad espectral era incapaz de explicar, y que condujo a la propuesta de que otros mecanismos contribuyen a la pérdida de la visión de color”* (Neit y Neitz, 1998, p. 110).

Existen otros importantes aspectos relacionados con la visión del color para cuya explicación se están intentando incorporar los hallazgos de la genética molecular. Por ejemplo, a partir de algunos datos se ha intentado explicar la *tricromaticidad ante estímulos de gran tamaño* en observadores dicrómatas. Una forma tentativa de explicar este fenómeno (descrito en el apartado anterior), sería aludir a la expresión, más allá de la fovea, de genes asociados a fotopigmentos diferentes del que está presente en la parte central de la retina del dicrómata. Sin embargo, un hecho es rotundamente contrario a este tipo de explicación: está demostrado que existen algunos observadores dicrómatas de gen único que muestran este tipo de tricromaticidad (Crognale et al., 1999).

Otro aspecto que causa gran controversia es la posibilidad de que en un observador humano pueda darse la *tetracromaticidad*. Por ejemplo, la posibilidad de que una mujer heterozygótica pueda expresar cuatro fotorreceptores diferentes en su retina deriva del proceso de inactivación del cromosoma X. Esta característica se ha demostrado 1) en mujeres portadoras de defectos protán o deután (Sharpe et al., 1999), y 2) en mujeres normales que supuestamente han heredado las dos variantes polimórficas L(ala¹⁸⁰) y L(ser¹⁸⁰) (Neitz, Kraft y Neitz, 1998, Neitz y Neitz, 1998). Sin embargo, la posible tetracromaticidad asociada a la existencia de cuatro tipos de fotorreceptores no ha sido demostrada nunca, al menos en condiciones normales de observación (Sharpe et al., 1999).

Como conclusión sobre el estado actual del estudio de la genética de los daltonismos, en lo que respecta a la relación entre fenotipo y genotipo, la clasificación cualitativa de las alteraciones (protán vs. deután) está bien correlacionada con la secuencia genética, pero la clasificación cuantitativa no tanto (Smith y Pokorny, 2003,

p. 141). El conocimiento que actualmente se posee sobre las causas genéticas de los defectos tritán y los monocromatismos no es tan completo como el que se posee sobre los daltonismos, principalmente por la escasez de casos analizados. A continuación se exponen algunas características, sin entrar en detalles.

Defectos tritán

Este tipo de defectos se heredan como un rasgo autosómico dominante, y se deben, como los defectos protán y deután, a alteraciones en el gen que codifica la opsina correspondiente (Sharpe et al., 1999), con la importante diferencia de que en esta ocasión el gen está situado en el cromosoma 7. Se han detectado tres mutaciones puntuales diferentes que pueden causar este tipo de defectos, cuyo grado de manifestación parece depender en parte del tipo de mutación. Dado el entorno inmediato del gen que codifica el fotorpigmento C, localizado en el cromosoma 7 sin otros genes con secuencias genéticas similares, el sobrecruzamiento intragenético, mecanismo que da lugar a los daltonismos anómalos, no se da.

Monocromatismos

Los monocromatismos en los que sólo existen conos C están causados por la pérdida o la reorganización del conjunto de genes ligados al cromosoma X que codifican las opsinas de los fotorpigmentos L y M (Sharpe et al., 1999). Igual que los defectos protán y deután, se transmite como un rasgo recesivo ligado al cromosoma X. En el caso de los monocromatismos “con sólo conos M” o “sólo conos L”, se desconoce el mecanismo genético causante. Por último, sí se conocen en parte los mecanismos causantes de los monocromatismos en los que sólo se conservan los bastones, que se heredan como un rasgo autosómico recesivo. Se trata de un desorden heterogéneo, asociado con diferentes loci, como el brazo q del cromosoma 2 o el brazo q del cromosoma 8. Parece que las mutaciones encontradas afectan a procesos comunes a los tres tipos de conos, como la fototransducción.

1.3.1.3. DIAGRAMAS DE CROMATICIDAD Y LÍNEAS DE CONFUSIÓN

Tal y como se ha dicho en el apartado anterior, un dicrómata confunde muchos colores que un tricrómata normal puede distinguir. Además, en el apartado 1.2.3. vimos que es usual representar los colores mediante un diagrama de cromaticidad. En este apartado se expone un método que, partiendo de la base de que el dicromatismo es una versión reducida del tricromatismo (hipótesis de Köning), permite, dado un estímulo A de coordenadas cromáticas x_A , y_A , determinar qué otros estímulos pueden ser confundidos con A por un dicrómata, así como representarlos en un diagrama de cromaticidad.

La Figura 3.5, que representa un diagrama de cromaticidad calculado a partir de las respuestas de los tres tipos de conos (MacLeod y Boynton, 1979), ilustra geométricamente la esencia de este método, basado en las denominadas *líneas de confusión*. Cualquier punto de una línea recta cuyo origen sea el punto (1, 0) tiene la peculiaridad de mantener constante la razón m/s , y por tanto el patrón relativo de respuestas de estos dos tipos de conos de la retina, por lo que todos los estímulos representados por dicha línea serán indistinguibles para un protanope (a condición de que produzcan la misma luminosidad para este observador), ya que este carece de fotopigmento L. Por esta razón a dicha línea se la denomina línea de confusión protanope.

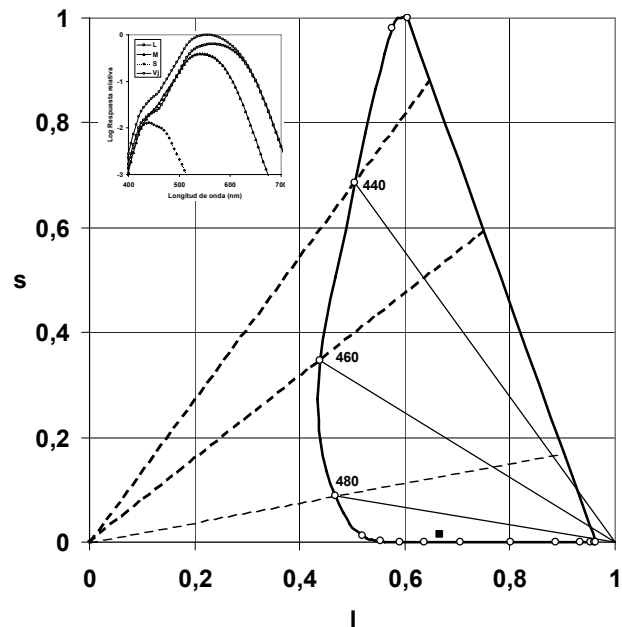


Figura 3.4. Líneas de confusión representadas en un diagrama de activación de los conos. Los valores de las coordenadas l y s han sido computados a partir de los fundamentales de los conos del modelo de Smith y Pokorny (1975) (mostrados en el recuadro interior). Se muestran las líneas de confusión protanope (líneas rectas continuas) y deuteranope (líneas rectas discontinuas) para estímulos espectrales de 440, 460 y 480 nm. El cuadrado negro muestra la cromaticidad del estímulo equienergético. Adaptado de MacLeod y Boynton (1979).

Del mismo modo, las líneas cuyo origen es el punto (0, 0) son líneas de confusión deuteranope, y cada una de ellas representa un conjunto de estímulos indistinguibles para este observador (a luminosidad constante), puesto que mantienen invariable la ratio l/s . Por último, cualquier línea recta vertical perpendicular al eje de abscisas es una línea de confusión tritanope, puesto que mantiene constantes los valores de l y m , variando únicamente el valor de s , y representa un conjunto de estímulos indistinguibles para este tipo de observador (a luminosidad constante).

A pesar de que en los diagramas de excitación de conos resulta más obvio comprender la naturaleza de las líneas de confusión, también denominadas *líneas pseudoisocromáticas*, es muy útil poder representar este tipo de líneas en diagramas de cromaticidad homologados como los de la CIE, basados en funciones oficiales de igualación de color. Puesto que dichas funciones son, teóricamente, combinaciones lineales de las respuestas de los conos, las líneas rectas que son líneas de confusión en un diagrama de excitación de conos lo seguirán siendo en un diagrama de cromaticidad de la CIE. Para resolver la ecuación que permite expresar las funciones de igualación de color $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, y $\bar{z}(\lambda)$ como combinación lineal de los fundamentales de los conos,

$$\begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_p x_{pc} & K_d x_{dc} & K_t x_{tc} \\ K_p y_{pc} & K_d y_{dc} & K_t y_{tc} \\ K_p z_{pc} & K_d z_{dc} & K_t z_{tc} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{l}(\lambda) \\ \bar{m}(\lambda) \\ \bar{s}(\lambda) \end{pmatrix}, \quad (21)$$

donde $\bar{l}(\lambda)$, $\bar{m}(\lambda)$, y $\bar{s}(\lambda)$ son dichos fundamentales, es necesario establecer x_{pc} , y_{pc} , y z_{pc} , las coordenadas cromáticas del punto de confusión protanope, x_{dc} , y_{dc} , y z_{dc} , las del punto de confusión deuteranope y x_{tc} , y_{tc} , y z_{tc} , las del tritanope (K_p , K_d , y K_t son constantes cuya función es escalar la respuesta de los fundamentales). Despejando en esta ecuación lineal, nos queda la que en esencia es la ecuación que permite establecer las respuestas de los fundamentales de los conos a partir de la utilización de datos derivados de observadores dicrómatas (véase el apartado anterior):

$$\begin{pmatrix} \bar{l}(\lambda) \\ \bar{m}(\lambda) \\ \bar{s}(\lambda) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_p x_{pc} & K_d x_{dc} & K_t x_{tc} \\ K_p y_{pc} & K_d y_{dc} & K_t y_{tc} \\ K_p z_{pc} & K_d z_{dc} & K_t z_{tc} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{pmatrix}. \quad (22)$$

En realidad, esta ecuación no es más que un caso particular de la más general (ecuación (8)), que permite el paso de un sistema de primarios a otro diferente conociendo las coordenadas cromáticas del nuevo sistema, con la peculiaridad de que en esta ocasión los primarios son precisamente los fundamentales de los conos (Kaiser y Boynton, 1996, Apéndice III). La Tabla 3.8 muestra algunas estimaciones de las coordenadas cromáticas de los puntos confusión de cada tipo de dicrómata utilizadas a lo largo del desarrollo de la ciencia de la visión del color para estimar los fundamentales de los conos.

Tabla 3.8. Coordenadas cromáticas de los puntos de convergencia de observadores dicrómatas. Se especifican las funciones de igualación de color (CMFs), así como coordenadas cromáticas del punto de convergencia protanope (x_p, y_p), deuteranope (x_d, y_d) y tritanope (x_t, y_t), empleadas en diferentes investigaciones sobre los fundamentales de los conos.

Investigación	x_p	y_p	x_d	y_d	x_t	y_t	CMFs
Wyszecki y Stiles (1967)	0,747	0,253	1,08	-0,08	0,171	0	CIE 1931
Vos y Walraven (1971)	0,7465	0,2535	1,4	-0,4	0,1748	0,0044	Judd (1951)
Smith y Pokorny (1975)	0,7465	0,2535	1,4	-0,4	0,1748	0	Judd (1951)

En la Figura 3.6 se representan gráficamente, en dos tipos de diagrama de cromaticidad, el CIE xy 1931 (panel de la izquierda) y el CIE $u'v'$ 1976 (panel de la derecha), diferentes líneas de confusión para varios estímulos: el iluminante C (representado mediante un cuadrado negro) y diferentes estímulos espectrales (470, 480, 490, 500, 510 y 520 nm en el caso de protanopes y deuteranopes, y 500, 520, 540, 560, 580 y 600 nm en el caso de los tritanopes). Todos los estímulos que caen a lo largo de una de estas líneas son pues, teóricamente, indistinguibles para el tipo de dicrómata correspondiente siempre que tengan la misma luminosidad para este. Por ejemplo, las líneas de confusión que pasan por el iluminante C representan estímulos indistinguibles, y su intersección con el locus espectral coincide con la zona neutral de cada tipo de dicrómata reseñadas la Tabla 3.3 (con mínimas variaciones debido al uso de distintos blancos de referencia). En el caso de los observadores tricrómatas anómalos, su reducción en la discriminabilidad cromática sigue siendo caracterizable en términos de líneas de confusión, pero mientras que las confusiones de los dicrómatas se extienden a lo largo de *toda* la línea, las de los tricrómatas anómalos sólo se extienden a lo largo de *parte* de esta línea, estando la magnitud de dicha extensión directamente relacionada

con la gravedad de la alteración (Birch, 1993, capítulo 4; Hunt, 1995, sección 3.6; Regan, Reffin y Mollon, 1994, véanse especialmente las Figuras 8-11 de este artículo).

Una limitación muy importante del uso de las líneas de confusión deriva de las propias características que definen un diagrama de cromaticidad. Puesto que la información sobre la intensidad de la estimulación está ausente, estas líneas sólo informan sobre la cromaticidad que ha de tener un estímulo para ser confundido con otro, pero para que de hecho esto sea así, los estímulos han de tener la misma luminosidad para el dicrómatas. Por otra parte, si bien hace tiempo que se duda de la validez de las líneas pseudoisocromáticas “clásicas” (Fletcher y Voke, 1985, p. 161) a la hora de trabajar con observadores concretos, limitación que se ha hecho más obvia hoy día si cabe debido al descubrimiento de los polimorfismos de los genes que codifican las opsinas de los fotopigmentos de los conos (Sharpe et al., 1999), su valor es indiscutible tanto a la hora del diseño de tests de visión del color (Birch, 1993) como a la hora de caracterizar las alteraciones de la visión del color de observadores dicrómatas y tricrómatas anómalos (Regan, Reffin y Mollon, 1994, Smith y Pokorny 2003).

Aunque las estimaciones más actuales de los fundamentales de los conos, de reconocido valor en el estudio de la visión del color, como las de Stockman, MacLeod y Johnson (1993), Stockman y Sharpe (2000), prescinden de las funciones de igualación de color de la CIE y utilizan como base de datos colorimétricos las funciones de igualación de Stiles y Burch (1955, 1959), la ventaja de trabajar con modelos como los recogidos en la Tabla 3.8 reside en que de esta manera es posible utilizar los diagramas de cromaticidad asociados homologados por la CIE. En consonancia, las coordenadas cromáticas de los puntos de convergencia protanope, deuteranope y tritanope empleadas en la Figura 3.6 (representados mediante círculos negros), están tomadas de Regan, Reffin y Mollon (1994). Esta elección ofrece la ventaja de que, aun sacrificando en algo en términos de precisión, las líneas de confusión se pueden representar en un diagrama de cromaticidad como el *CIE $u'v'$* , que como se vio en el apartado 1.2.5 se aproxima la tan deseada uniformidad (Hunt, 1995)¹⁵.

¹⁵ Concretamente, Regan, Reffin y Mollon (1994) desarrollaron el Cambridge CVT, basado en el empleo de líneas de confusión para diagnosticar el tipo y el grado de las deficiencias en la visión del color de observadores dicrómatas y tricrómatas anómalos, que presenta las estimulaciones y los resultados utilizando como herramienta colorimétrica el diagrama de cromaticidad *CIE $u'v'$* .

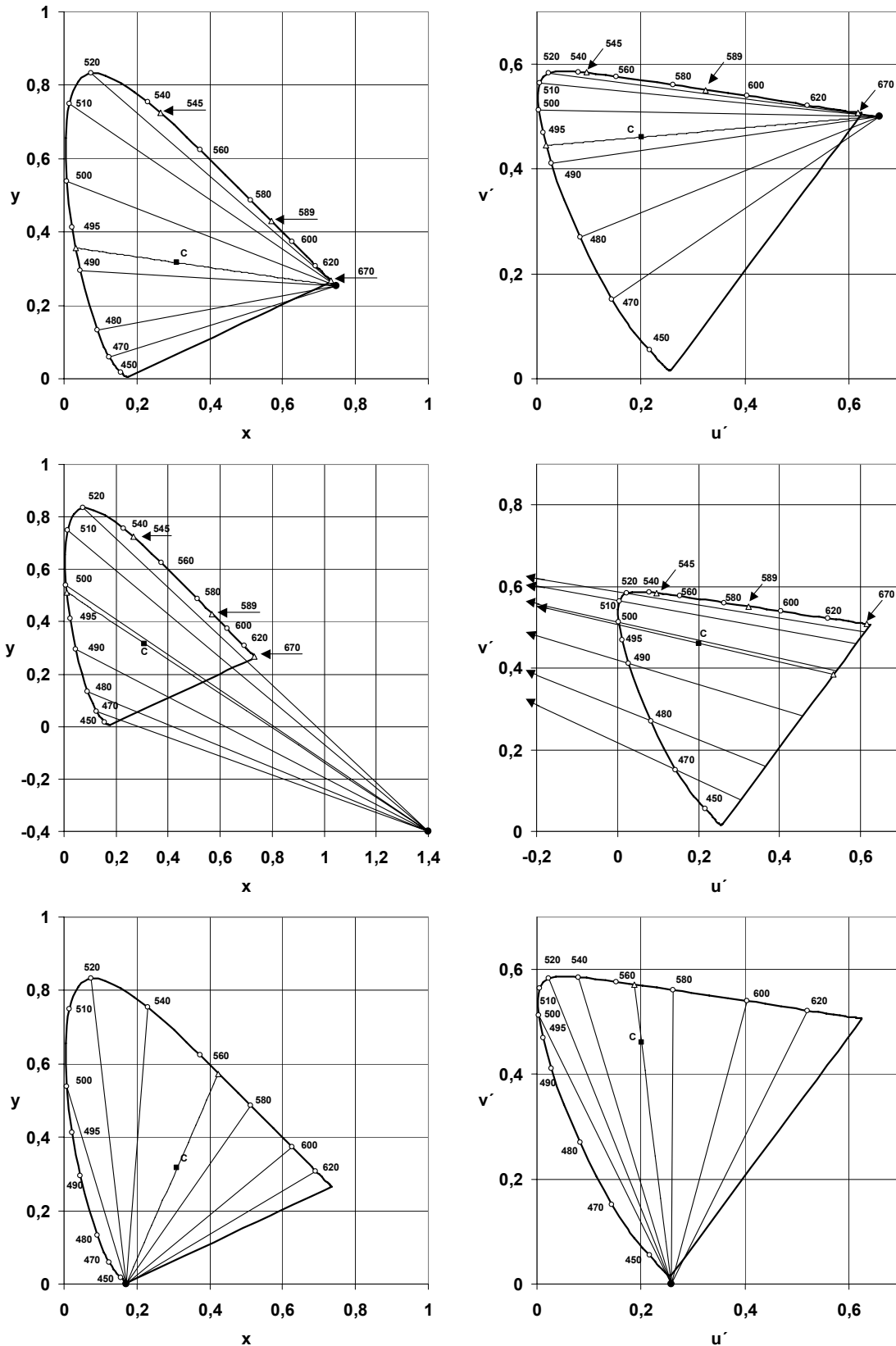


Figura 3.5. Líneas de confusión y tipos de dicrómatas. Líneas de confusión protanope (primera fila), deuteranope (segunda fila) y tritanope (tercera fila) representadas en diagramas de cromaticidad CIE xy 1931 (izquierda) y CIE u'v' 1976 (derecha) para distintos estímulos (más detalles en el texto). Los círculos negros representan los puntos de confusión protanope ($x_p = 0,747$, $y_p = 0,253$), deuteranope ($x_d = 1,40$, $y_d = -0,40$), y tritanope ($x_t = 0,171$, $y_t = 0$).

1.3.1.4. ¿QUÉ “VE” UN DICRÓMATA?: SIMULACIÓN DE LA APARIENCIA DEL COLOR

Hasta ahora hemos descrito algunos aspectos de los mecanismos implicados en la percepción del color de los observadores dicrómatas desde un punto de vista estrictamente funcional, con especial mención a las confusiones de colores que les caracterizan. Ahora bien, inevitablemente surge la pregunta: *¿qué es lo que de hecho experimenta* un dicrómata cuando, por ejemplo, observa el arco iris? Uno de los aspectos que más interés y controversia ha causado dentro de la ciencia del color ha sido el intentar imaginarse qué es lo que verdaderamente ve un dicrómata (Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 10; Sharpe et al, 1999).

En 1995, en la revista *Nature*, Viènot, Brettet, Ott, Ben M'Barek y Mollon, publicaron un artículo intentando dar respuesta al interrogante planteado. A pesar de que los autores son conscientes de que *“la cualidad de las sensaciones de otra persona nunca puede conocerse plenamente”* (p. 128), en su trabajo describen la racionalidad de un algoritmo mediante el cual es posible simular la percepción cromática de un dicrómata, de manera que un observador con visión normal del color pueda experimentar los mismos colores que aquél ante cualquier escena. El algoritmo empleado para obtener este tipo de simulaciones se encuentra descrito de forma más detallada en Brettel, Viènot y Mollon (1997). El supuesto principal del que parte la simulación es que la visión de los observadores dicrómatas es una *versión reducida* de la de los observadores tricrómatas normales (hipótesis de Köning). Partiendo de este supuesto, el algoritmo establece, para un estímulo **Q**, y dado un tipo de dicrómata, un estímulo **Q'** que es indistinguible de **Q** y que produce la misma experiencia cromática tanto en observadores tricrómatas normales como en dicrómatas del tipo especificado. De esta forma es posible simular la apariencia de cualquier escena, por compleja que sea, para cualquier tipo de dicrómata, como puede observarse en la Figura 3.7.

El algoritmo propuesto por Brettel et al. (1997) no hace uso de diagramas de cromaticidad, sino que utiliza la colorimetría LMS (donde cada valor triestímulo representa la activación de uno y sólo uno de los tres tipos de conos) para llevar a cabo esta simulación, empleando en concreto los fundamentales propuestos por Stockman,

MacLeod y Johnson (1993). Por tanto, los estímulos \mathbf{Q} y \mathbf{Q}' quedan definidos como $\mathbf{Q} = (L_Q, M_Q, S_Q)$ y $\mathbf{Q}' = (L_{Q'}, M_{Q'}, S_{Q'})$.

Si se representan en un gráfico tridimensional en el que cada eje representa la activación de uno de los conos, las líneas de confusión dicrómatas son fácilmente determinables, puesto que muestran todos aquellos estímulos que varían únicamente en el valor de la activación del cono ausente en función del tipo de dicrómata del que se trate, manteniendo la excitación de los dos conos restantes *constante e igual*. Las líneas de confusión serán por tanto paralelas a uno de los ejes: al eje L ($M_{Q'} = M_Q$ y $S_{Q'} = S_Q$) en el caso de los protanopes, al eje M ($L_{Q'} = L_Q$ y $S_{Q'} = S_Q$) en el caso de los deuteranopes, y al S ($L_{Q'} = L_Q$ y $M_{Q'} = M_Q$) si se trata de tritanopes.

Pero sólo uno del conjunto de estímulos que componen la línea de confusión, el definido por el vector \mathbf{Q}' , tendría la propiedad de producir *la misma* experiencia (en opinión de los autores) en observadores dicrómatas y tricrómatas. En el caso de los protanopes, por tanto, el valor indeterminado¹⁶ es $L_{Q'}$, en el caso de los deuteranopes, $M_{Q'}$, y en el caso de los tritanopes, $S_{Q'}$. ¿Cuál es ese estímulo en concreto? Ante esta ambigüedad, los autores recurrieron a la literatura especializada para buscar una respuesta a esta cuestión, encontrando en los estudios realizados con unos observadores muy especiales, los dicrómatas unilaterales (véase el apartado 1.3.1.4), las bases para establecer qué experiencias cromáticas son comunes entre dicrómatas y tricrómatas normales y poder desarrollar por tanto la simulación. ¿Qué estímulos sirven de “*anclajes perceptivos*” a partir de los cuales es posible delimitar el conjunto de colores que se perciben igual tanto por observadores dicrómatas como por observadores normales? En breve:

1. Se asume que la percepción que produce un estímulo equienergético, \mathbf{aE} , es la misma tanto en observadores tricrómatas como en observadores dicrómatas, independientemente de su intensidad ($0 \leq a \leq 1$)¹⁷. Por lo tanto, el origen \mathbf{O} ($L_O = M_O = S_O = 0$) y el estímulo \mathbf{E} definen el eje neutral OE .

¹⁶ Puesto que cualquier valor producirá un estímulo indistinguible para el dicrómata, los autores denominan a este valor triestímulo “componente *fisiológicamente indeterminado*”.

¹⁷ Los autores definen las coordenadas de \mathbf{E} en función del metámero de un estímulo equienergético de mayor intensidad reproducible en el monitor en el que llevan a cabo la simulación.

2. El espacio tridimensional LMS propio de un observador tricrómatas normal, se reduce a dos semiplanos en el caso de los dicrómatas, cada uno de los cuales está asociado a la percepción de un único tono. ¿Cuáles son estos tonos que tanto un dicrómatas como un tricrómatas perciben igual? A partir de los estudios realizados con dicrómatas unilaterales, se realizan las siguientes *inferencias*:

- 2.1. Los tonos producidos por estímulos espectrales de 575 nm, amarillo, y 475 nm, azul, son idénticos para protanopes, deuteranopes, y tricrómatas normales. Esta inferencia se basa en varios estudios sobre dicrómatas unilaterales de origen genético.
- 2.2. Los tonos producidos por los estímulos espectrales de 660 nm, rojo, y 485 nm, azul-verdoso, son idénticos para observadores tritanopes y tricrómatas normales. Esta inferencia se basa en un estudio sobre un caso de tritanopia unilateral adquirida.

El eje acromático OE , junto con las coordenadas LMS del par de estímulos espectrales A_{575nm} y A_{475nm} , en el caso de protanopes y deuteranopes, o A_{660nm} y A_{485nm} en el caso de tritanopes, definen los dos semiplanos que conforman el conjunto de experiencias cromáticas comunes para dicrómatas y tricrómatas normales.

El color Q' queda establecido de forma unívoca por la intersección de la línea de confusión y el semiplano definido por el origen O , el estímulo equienergético E , y el estímulo monocromático correspondiente (que viene determinado por el tipo de dicrómatas y por la propia localización de Q respecto a OE), ya que tiene que cumplirse la condición

$$(\vec{E} \times \vec{A})\vec{Q}' = 0, \quad (23)$$

puesto que Q' ha de ser perpendicular a la normal del plano que lo contiene. Este procedimiento se puede aplicar a todos los i elementos de una imagen para obtener las i tríadas de valores LMS o vectores Q' correspondientes para cada tipo de dicrómatas, para después reproducir la imagen mediante, por ejemplo, un monitor (véanse las Figura 3.7). A pesar de manifestar sus reservas sobre la validez del método, los autores

defienden que como mínimo puede ser muy valioso para que un observador tricrómatas pueda evaluar la variedad cromática que experimenta un observador dicrómatas ante cualquier escena.

¿Existe un método para simular la percepción del color de los observadores anómalos? Puesto que las anomalías ofrecen un enorme rango de severidad, pero sobre todo porque no se pueden interpretar como una versión reducida de la visión normal del color, el algoritmo descrito no puede aplicarse a este tipo de observadores. En los textos especializados (véase Hurvich, 1981, Kaiser y Boynton, 1996), es habitual recurrir al *debilitamiento* de las sensaciones de rojo y verde a nivel de mecanismos oponentes para intentar imaginarse la percepción de protanómalos y deuteranómalos, incluyendo un oscurecimiento ante estímulos compuestos por longitudes de onda larga en el caso de los protanómalos.

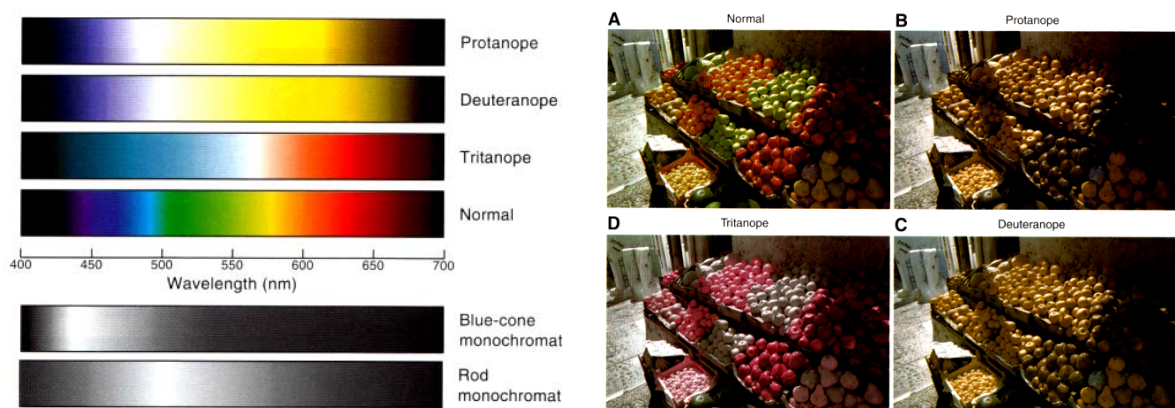


Figura 3.7. Simulación de la apariencia del color en distintos tipos de dicromatismo y monocromatismo. Estas figuras, tomadas de Sharpe et al. (1999, Figura 1.13 y 1.14; a partir de la aplicación del algoritmo descrito por Brettel, Viènot y Mollon, 1997)), ilustran la reducción de la gama cromática propia de cada alteración. Debido a errores de reproducción, únicamente deben interpretarse de forma ilustrativa.

1.3.2. ALTERACIONES ADQUIRIDAS DE LA VISIÓN DEL COLOR

A diferencia de las alteraciones congénitas de la visión del color, que afectan a los fotopigmentos contenidos en los fotorreceptores, las alteraciones adquiridas pueden ocurrir a distintos niveles del procesamiento visual, cabiendo distinguir entre las que se originan en las estructuras del medio ocular (previas a la absorción de luz por los fotorreceptores), en la retina, en las vías de conducción, y en el cerebro (Fletcher y Voke, 1985, capítulo 4). Sus causas son muy variadas (Sharpe et al., 1999), incluyendo: 1) el filtrado pre-receptorial, 2) el desprendimiento de retina, 3) las degeneraciones progresivas de los conos, 4) la degeneración macular, 5) las enfermedades vasculares, 6) el glaucoma, 7) las enfermedades del nervio óptico, 8) algunas enfermedades del sistema nervioso central, 9) la diabetes, 10) la lesión de estructuras relacionadas con el procesamiento visual, y 11) la acción de agentes tóxicos. La Tabla 3.9 enumera algunas características propias de este tipo de alteraciones y las contrapone a las de las alteraciones congénitas (véase también Fletcher y Voke, 1985, apartado 4.1.1.).

Tabla 3.9. Comparación entre las principales características de las deficiencias heredadas y adquiridas de la visión del color. Adaptado de Birch (1993, Tabla 9.1)

Defectos congénitos de la visión del color	Defectos adquiridos de la visión del color
Presentes desde el nacimiento	Aparecen después del nacimiento
El tipo y la severidad del defecto es constante a lo largo de la vida	El tipo y la severidad de la deficiencia fluctúan
El tipo de defecto puede clasificarse con precisión	El tipo de defecto puede ser difícil de clasificar. Frecuentemente ocurren defectos combinados o inespecíficos
Afectan a ambos ojos por igual (salvo muy infrecuentes excepciones)	Frecuentemente ocurren diferencias monoculares en el tipo y la severidad del defecto
La agudeza visual es normal (excepto en algunos tipos de monocromatismo), y el campo visual también	La agudeza visual está normalmente reducida, y frecuentemente ocurren reducciones en el campo visual
Predominantemente son de tipo protán o deután	Predominantemente son de tipo tritán
Mayor prevalencia en hombres	Igual incidencia en hombres y mujeres

La gravedad de las alteraciones adquiridas de la visión del color cubre un amplio rango, en función del tipo de que se trate y de su fase de desarrollo, pudiendo variar desde la afección leve de un eje de discriminación cromática, hasta la pérdida completa de la visión del color propia del monocromatismo (como sucede en la acromatopsia cerebral).

1.3.1.1. CLASIFICACIÓN FUNCIONAL

La clasificación de las alteraciones adquiridas de la visión de color no es tan sencilla de realizar como la de las alteraciones congénitas (Fletcher y Voke, 1985; Birch, 1993; Kaiser y Boynton, 1996; Pujol, 2002). Köllner (1912, citado en Fletcher y Voke, 1985, pp. 215, 233) se basó en los resultados derivados de la campimetría cromática para realizar el que se reconoce como primer intento de clasificación, que dio lugar a la denominada regla de Köllner, la cual establece una asociación entre la localización de la patología y la afección de un eje cromático determinado. Concretamente, las afecciones retinianas estarían asociadas con la pérdida de discriminación cromática en el eje azul-amarillo, mientras que las afecciones a niveles superiores se asociarían con la alteración del eje rojo-verde. Sin embargo, este autor dejó clara la importancia de la degeneración progresiva en las alteraciones adquiridas de la visión de color, de forma que actualmente la regla de Köllner se interpreta de la siguiente manera (Kaiser y Boynton, 1996, pp. 458-459): las alteraciones de tipo tritán tienden a producirse en las primeras fases de las enfermedades que afectan a la retina, mientras que las de tipo rojo-verde son más propias de las primeras etapas de enfermedades que afectan a las vías de conducción. La regla de Köllner, así entendida, recoge una regularidad empírica, aunque tiene importantes excepciones (por ejemplo: en distrofias de la retina central se ve afectado el mecanismo rojo-verde, mientras que algunas lesiones producidas más allá del quiasma óptico pueden producir una alteración del mecanismo azul-amarillo, véase Birch, 1993, p. 142).

La clasificación propuesta por Verriest (1963, véase la sección 4.2 de Fletcher y Voke, 1985; Birch, 1993, p. 142) se basa en la caracterización funcional del tipo de alteración cromática, en conjunción con la posible alteración asociada de la sensibilidad espectral, y distingue entre tres tipos de afecciones adquiridas. El Tipo I incluye alteraciones que afectan al eje cromático rojo-verde y que muestran una reducción de la sensibilidad espectral ante longitudes de onda larga (propia de los defectos tipo protán), de manera que el máximo de la función de sensibilidad espectral está desplazado hacia longitudes de onda corta (fenómeno conocido como “escotopización”). El Tipo II incluye alteraciones que igualmente afectan al mecanismo rojo-verde, pero en las que la sensibilidad espectral relativa se mantiene aproximadamente normal. Finalmente, las alteraciones de Tipo III son de carácter tritán, y se dividen en dos subtipos en función de

si existe o no una reducción de la sensibilidad ante longitudes de onda larga. Dentro del este último tipo se incluyen las alteraciones debidas a los cambios que sufre el cristalino con la edad (Fletcher y Voke, 1985, p. 215), aspecto que se trata en el siguiente apartado con más detalle. Por último, la clasificación de Marré (1973, citado en Birch, 1993, p. 144; Kaiser y Boynton, 1996, p. 459), que se basa en el método de adaptación cromática de Wald, refleja cuál(es) de los tres mecanismos asociados a los diferentes tipos de conos se ve(n) afectado(s)¹⁸. La Tabla 3.10 muestra a grandes rasgos la clasificación de Verriest y su correspondencia con la de Marré.

Siempre que exista una deficiencia adquirida de la visión del color se recomienda realizar un seguimiento, puesto que su gravedad puede fluctuar a lo largo del tiempo (Birch, 1993, capítulo 4). Además, Kaiser y Boynton (1996) enfatizan la importancia de una detección temprana de estas alteraciones, puesto que “...Es posible que se pudieran diagnosticar antes los estadios de algunas enfermedades mediante la evaluación de la visión del color que mediante cualquier otro procedimiento, si existieran datos sobre la línea base del paciente y se utilizaran tests sofisticados” (p. 461).

Tabla 3.10. Tipos de alteraciones adquiridas de la visión del color. Tomado de Kaiser y Boynton (1996, Tabla 10.3, tomado a su vez de Smith y Pokorny, 1986b).

Tipo según Verriest	Pérdida de discriminación	Severidad	Pérdida de agudeza	Tipo según Wald-Marré	Desorden
Tipo I	Rojo-Verde	Leve	Moderado	IIb	Degeneración progresiva de los conos
		Severo	Severo	III	
		Leve	Leve	IIa	
Tipo II	Rojo-Verde + Azul	Moderado	Moderado	IIb	Desorden del nervio óptico
		Severo	Severo	III	
Tipo III + Pseudo PA	Azul	Leve	Leve	I	Desórdenes de la coroides
Tipo III	Azul + Rojo-Verde	Leve	Leve	I	Degeneración pigmentosa
		Moderado	Moderado	IIb	Enfermedad vascular, glaucoma, papiloedema, atrofia óptica dominante, catarata

¹⁸ El empleo de la técnica de adaptación cromática ha sido muy valioso para el estudio del curso de muchas alteraciones adquiridas de la visión del color (Birch, 1993, p. 144). En términos generales, se ha establecido que en las enfermedades retinianas el primer mecanismo afectado es el asociado a los conos S. Los otros dos mecanismos se ven alterados a medida que la enfermedad progresa. En enfermedades que afectan al nervio óptico, el orden de alteración es el siguiente: el mecanismo asociado a los conos S también es el que se ve afectado en primer lugar, seguido después del mecanismo asociado a los conos M y por último del asociado a los conos L.

1.3.2.2. ALTERACIONES DE LA VISIÓN DEL COLOR ASOCIADAS AL ENVEJECIMIENTO

De entre todas las alteraciones adquiridas de la visión de color, sin lugar a dudas la causa más habitual de pérdida adquirida de la discriminación cromática se debe al envejecimiento natural de cristalino (Kaiser y Boynton 1996, pp. 459-460). Como se ha indicado en el apartado anterior, el progresivo amarillamiento de este asociado a la edad produce una alteración que dentro de la clasificación propuesta por Verriest sería de Tipo III o tritán (Fletcher y Voke, 1985, p. 215).

¿A partir de qué edad comienza a observarse este efecto? Parece que el deterioro de la visión cromática no es generalizado, puesto que si bien a partir de los 55-60 años empieza a deteriorarse la discriminación que depende del mecanismo rojo-verde, la aparición del deterioro de tipo tritán, aunque sutil en sus comienzos, es mucho más temprana (Fletcher y Voke, 1985, sección 1.13.4). Verriest (1963) evaluó la discriminación del tono en 480 observadores que abarcaban un rango de edad entre los 10 y los 64 años, encontrando un incremento de los errores de tipo tritán a partir de una edad tan temprana como son los 20-24 años¹⁹. Este hecho se corresponde con el aumento de la densidad del cristalino observado en personas mayores de 25 años, como veremos al describir los cambios que experimenta el ojo envejecido (Coren y Girgus, 1972, Werner, 1982, Pokorny, Smith y Lutze, 1987).

Sin embargo, el amarillamiento del cristalino no es el único cambio que se produce con la edad. En una revisión crítica sobre las consecuencias del envejecimiento sobre la visión, Weale (1986) remarcaba la existencia de grandes lagunas de conocimiento, y se mostraba reacio a la idea de que exista un “*envejecimiento generalizado*” que deteriora de forma uniforme todas las funciones visuales. En el ámbito de la visión del color se han realizado estudios sistemáticos para intentar establecer qué aspectos son los que sufren un deterioro con la edad, algunos de los cuales se comentan a continuación. En este contexto, los estudios aportados por Werner

¹⁹ Verriest (1963) llevó a cabo la evaluación de la discriminación del tono aplicando el test Farnsworth-Munsell de 100 tonos bajo una iluminación tipo C de 100 lx. Los resultados no deben interpretarse de forma alarmista, sino simplemente comparativa, puesto que este test utiliza muestras cuya separación colorimétrica es muy pequeña, por lo que su correcta ejecución exige una discriminación cromática muy fina (véase el apartado sobre *Diagnóstico*).

y sus colaboradores durante las últimas dos décadas (Werner, 1998; Shinomori, 2005) son de gran valor. Tanto es así, que gran parte de la información que se aporta a continuación proviene de los trabajos realizados por este autor.

En líneas generales, el panorama general que actualmente domina el estudio científico sobre el deterioro de la percepción del color con la edad puede describirse de la siguiente manera: a pesar de los cambios fisiológicos que sufre el sistema visual a medida que envejecemos (cambios en las estructuras pre-retinianas, disminución de la población de fotorreceptores y de la densidad óptica de estos, degeneración de células ganglionares, etc.), no todas las funciones visuales relacionadas con el procesamiento del color se ven tan afectadas como cabría esperar. Por ejemplo, se pierde capacidad de discriminación cromática, pero sólo bajo ciertas circunstancias, y parece que en lo que atañe a la apariencia del color existe una remarcable constancia a lo largo del ciclo vital, lo cual se interpreta como el resultado de un proceso de compensación del sistema visual ante los cambios que va sufriendo con la edad.

A continuación se especifica el cambio de la densidad del cristalino asociado a la edad, para, en las secciones siguientes, preguntarnos si existen cambios en la visión del color asociados al envejecimiento, y en qué medida estos son atribuibles a la progresiva reducción de la transmitancia de longitudes de onda corta. En este contexto, Weale (1991) propuso que una hipótesis de trabajo fundamental a la hora de explicar qué mecanismos de la visión del color eran responsables de los cambios encontrados, pasaba en primer lugar por descartar los factores ópticos como explicación de dichos cambios. Con el objetivo de facilitar la lectura de los apartados en los que se abordan los cambios sufridos en la sensibilidad espectral, la discriminación cromática y la apariencia del color, se ha confeccionado la Tabla 3.11, que resume los trabajos que se comentan, aportando información sobre los observadores incluidos en cada estudio y el tipo de estímulos empleados, posibilitando que en el texto se traten fundamentalmente los resultados y las conclusiones de los mismos.

Por último, es importante recordar que muchos de los estudios que se citan en las siguientes secciones intentan aportar información acerca del curso temporal de los cambios de la visión del color. Tal vez el aspecto de mayor relevancia a este respecto es si el deterioro encontrado ocurre de forma continua a partir del comienzo de la edad

adulta (o incluso antes), o por el contrario lo hace más tardíamente y de forma abrupta. Johnson y Choy (1987) reanalizaron diferentes estudios sobre cambios de las funciones visuales asociados a la edad, recalcando que un problema crucial a la hora de seleccionar a los observadores eran precisamente los criterios de selección, relacionados con qué se entiende exactamente por envejecimiento normal frente a envejecimiento patológico. Encontraron que la mayoría de los estudios psicofísicos y electrofisiológicos coincidían en mostrar que los decrementos en las funciones visuales se aceleraban a partir de los 50-60 años, y que se daba un aumento de la variabilidad a medida que la edad avanzaba. Lanzaron la hipótesis de que tal vez esta regularidad no reflejase un envejecimiento normal, sino por el contrario el aumento de patologías subclínicas en la supuesta población normal envejecida. Por ejemplo, en la literatura especializada era habitual encontrar que la agudeza visual, los ajustes realizados en un anomaloscopio, o la sensibilidad al contraste sufrían un cambio abrupto a partir de una edad determinada, mientras que en otros estudios se concluía que el deterioro de la discriminación del color o el aumento de los umbrales incrementales periféricos, era gradual.

Revisaron los resultados obtenidos en varios estudios para comprobar si podían describirse óptimamente a partir de una función lineal o exponencial, y alertaron sobre la posibilidad de que al emplear la regresión lineal para describir el deterioro de una capacidad visual en función de la edad (veremos cómo en muchos de los estudios que se citan a continuación esto es algo habitual), se corre el riesgo de concluir que existe un deterioro gradual, enmascarando tal vez la existencia de un cambio abrupto. Encontraron que en muchos casos sucedía exactamente esto último, ya que podían distinguirse en realidad dos fases dentro del deterioro de la función visual examinada, y tal vez la segunda se debía en parte a la inclusión de observadores con enfermedades visuales incipientes. Johnson y Choy (1987) concluyeron su trabajo recordando que si se quiere contar con normas a partir de las cuales detectar posibles casos tempranos de patología visual, entonces deberán usarse criterios estrictos de normalidad (por ejemplo, no bastaría con un examen oftalmológico, puesto que podrían incluirse en el estudio casos incipientes de degeneración macular asociada a la edad, glaucoma, retinopatía diabética, o neuropatías ópticas). Por el contrario, los criterios de selección se deben relajar si se pretende estudiar el envejecimiento típico de la población (obteniendo así información válida para fines epidemiológicos).

Tabla 3.11. Resumen de los trabajos científicos comentados sobre envejecimiento y visión del color.

Aspecto de la visión del color estudiado		Trabajo	Observadores	Estímulos
Sensibilidad espectral	Sensibilidad espectral escotópica	Jackson, Owsley, Cordle y Finley (1998)	24 jóvenes (18 M y 6 H); 22-33 años 25 mayores (14 M y 11 H); 65-79 años	<ul style="list-style-type: none"> Estímulo espectral 450 nm Tamaño: 0,43° Presentación extrafoveal (meridiano horizontal: 4, 7, 32 y 38°, temporal y nasal)
	Función de sensibilidad espectral fotópica relativa (método de FHF)	Kraft y Werner (1994)	50 (26 H y 24 M); 19-85 años	<ul style="list-style-type: none"> EE espectrales Rango: 420 – 700 nm Tamaño: 1,2° Presentación foveal y maxwelliana E de referencia: blanco de banda ancha (5500K; 100 Td)
		Sagawa y Takahashi (2001)	99; 11-78 años	<ul style="list-style-type: none"> EE espectrales Rango: 420 – 700 nm Tamaño: 2° Presentación foveal y maxwelliana E de referencia: blanco ($x = 0,364$, $y = 0,423$; 100 Td)
	Mecanismos de los conos (π_1 , π_4 , π_5)	Werner y Steele (1988)	31 H y 45 M entre los 10 y los 84 años	<ul style="list-style-type: none"> EE espectrales (target) Rango: 420 – 550? nm (conos S); 500 – 650 (M y L) Tamaño: 1,1° (target); 12° (fondo) Presentación foveal Fondo adaptador de banda ancha
Discriminación cromática	Ejes tritán y de S constante	Scheffrin, Shinomori y Werner (1995)	15 H y 15 M entre los 22 y los 77 años	<ul style="list-style-type: none"> Mezcla de EE espectrales Líneas tritán individualizadas (420 nm y otra λ ajustada en el rango 527 – 542 nm); eje de S constante estándar (560 y 630 nm) Tamaño: campo bipartito de 2° Presentación foveal y maxwelliana Iluminancia retiniana igualada**
	Pureza colorimétrica	Kraft y Werner (1999a)	11 jóvenes (5 H y 6 M); 22-43 años (media, 30) 10 mayores (5 H y 5 M); 62-88 años (media, 74)	<ul style="list-style-type: none"> Mezcla de EE espectrales y E de referencia Rango: 420 – 680 nm Tamaño: 1,2° Presentación foveal y maxwelliana E de referencia: blanco de banda ancha ($x = 0,33$; $y = 0,35$; 250 Td y 10 Td) Iluminancia retiniana igualada**
	Longitud de onda	Shinomori, Scheffrin y Werner (2001)	4 jóvenes (39,9 años de media) y 4 mayores (72,5 años de media) Rango total: 22-78 años	<ul style="list-style-type: none"> EE espectrales Rango: 420 – 620-650 nm Tamaño: campo bipartito de 2° Presentación foveal y maxwelliana Iluminancia retiniana igualada**
Apariencia del color*	Tonos únicos espectrales	Scheffrin y Werner (1990)	50 (25 H y 25 M); 13,4-74,3 años	<ul style="list-style-type: none"> EE espectrales (7,1, 2,2 y 0,7 cd/m²) Tamaño: 0,95° Presentación foveal EE equiluminantes (según $V(\lambda)$)
	Punto acromático	Werner y Scheffrin (1993)	50 (25 H y 25 M); 10,8-77,8 años	<ul style="list-style-type: none"> Mezcla de EE espectrales complementarios (10, 100 y 1000 td) Amarillo y azul únicos individualizados; 600 nm y su complementario Tamaño: 1° Presentación foveal y maxwelliana EE equiluminantes (según $V(\lambda)$)
	Punto acromático tras operación de cataratas	Delahunt, Webster, Ma, y Werner (2005)	4 (2 H y 2 M) ; 63-84 años	<ul style="list-style-type: none"> Mezcla de EE primarios de un monitor CRT (32 cd/m²) Tamaño: 9,5° Presentación central EE equiluminantes (según $V_{10}(\lambda)$)
	Escalamiento del contenido cromático	Kraft y Werner (1999b)	21 (10 H, 11 M); 10 jóvenes (24-42; media, 30) 11 mayores (62-87, media, 73)	<ul style="list-style-type: none"> Mezcla ($P_c = 0,20$) de EE espectrales (50 td) y E de banda ancha (200 td) Rango: 420 – 700 nm Tamaño: 1,2° Presentación foveal y maxwelliana E de banda ancha ($x = 0,35$; $y = 0,39$) Ilum. retin. igualada indiv.** y según $V_M(\lambda)$

*: El brillo de estímulos espectrales se estudió en los trabajos de Kraft y Werner (1994) y Sagawa y Takahashi (2001).

**: La iluminancia retiniana se igualó individualmente mediante FHF.

Cambios en el cristalino asociados al envejecimiento

Durante el proceso de envejecimiento se producen varios cambios en diferentes estructuras del globo ocular, que afectan tanto a la calidad de la imagen proyectada sobre la retina como a la cantidad y el tipo de luz que alcanza los fotorreceptores:

- *Miosis pupilar*. El diámetro de la pupila disminuye con el envejecimiento, proceso denominado *miosis senil* (Weale, 1986; Wyszecki y Stiles, 1982, apartado 2.4.5), y que produce una reducción del nivel de iluminancia retiniana. Winn, Whitaker, Elliot y Phillips (1994) estudiaron cuantitativamente este fenómeno, encontrando un decremento lineal del diámetro de la pupila en función de la edad, cuya tasa variaba dependiendo del nivel de iluminación (de 0,15 mm por década a 4400 cd/m², hasta 0,43 mm por década a 9 cd/m²).
- *Presbicia*. El cristalino pierde progresivamente la capacidad para enfocar a distancias cortas (Weale, 1986).
- *Absorción pre-retiniana*. El progresivo aumento de la absorción selectiva de longitudes de onda corta altera el patrón de radiancia que atraviesa la córnea (Norren y Vos, 1974; Werner, 1982; Fletcher y Voke, 1985, sección 1.13.2; Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 10).

¿Qué consecuencias directas sobre la visión del color tienen estos factores? En principio, únicamente el último muestra una selectividad en función de la longitud de onda de la energía radiante que llega a la córnea. Sin embargo, tanto los efectos de la miosis senil como los de la presbicia deben ser tenidos en cuenta a la hora de evaluar la visión del color de un observador de edad avanzada. Por ejemplo, los efectos de la presbicia pueden paliarse mediante el uso de lentes correctoras. Por otra parte, la cantidad de iluminación es un factor muy importante a la hora de evaluar la visión cromática, y la reducción de la iluminancia retiniana causada por la miosis senil no puede olvidarse a la hora de realizar esta evaluación. Por ejemplo, en un estudio realizado por Knoblauch et al. (1987) con observadores de distintas edades (20-78 años), se manipuló experimentalmente el nivel de iluminancia para estudiar su efecto sobre la ejecución de un test de visión del color (el F-M 100 Hue). Los resultados mostraron que el mismo tipo de errores tritán propios de observadores envejecidos bajo niveles medios-altos de iluminación se produjeron en observadores jóvenes a niveles

más bajos de iluminancia (el desempeño en el test fue similar para el grupo de 70-79 años bajo una iluminancia de 180 lx, el grupo de 50-59 años bajo 18-57 lx, y el grupo de 20-39 años bajo 5,7 lx).

Sin embargo, el factor óptico más importante que puede afectar a la visión del color es la absorción pre-retiniana, puesto que altera significativa y selectivamente la composición espectral de la energía que llega a la retina. De todas las estructuras del medio ocular, el cristalino es sin lugar a dudas aquella que más cambios sufre en su función de transmitancia con la edad (Ruddock, 1972; Norren y Vos, 1974; Weale, 1986; Pokorny, Smith y Lutze, 1987), pero también hay pruebas que muestran que la córnea absorbe cada vez más luz de longitud de onda muy corta, aunque visible (Weale, 1986). La importancia de los cambios del cristalino queda reflejada en los estudios sobre absorción prerretiniana realizados empleando métodos psicofísicos, en los que a pesar de que están implicados todos los medios oculares (Norren y Vos, 1974), es común que los autores hablen del cristalino como la estructura que influye en sus resultados. En esta sección nos ocuparemos de un análisis más detallado del aumento de la densidad del cristalino asociado a la edad, empleando este nombre aunque se trate de estudios psicofísicos (véase por ejemplo Pokorny, Smith y Lutze, 1987).

En el apartado 1.2.7 se expuso la importancia que la absorción pre-retiniana tiene en la determinación psicofísica de la sensibilidad espectral y de las funciones de igualación de color. Puesto que la densidad del cristalino aumenta con la edad, esto debería tener un efecto mensurable en la determinación psicofísica de estas funciones. Y así es. Crawford (citado en Le Grand, 1972, y en Wyszecki y Stiles, 1982) propuso una relación cuantitativa para estimar el decremento en la función de sensibilidad escotópica para longitudes de onda menores de 500 nm con la edad. Ruddock (1965a, 1965b; citados en Ruddock, 1972) comprobó los efectos del cambio en la absorción del cristalino asociado a la edad sobre la función de sensibilidad fotópica de 500 observadores de edades comprendidas entre los 16 y los 70 años: las longitudes de onda media y sobre todo las de onda corta se vuelven menos eficientes, mientras que las longitudes de onda larga se hacen relativamente más efectivas (Le Grand, 1972). En la siguiente sección veremos este aspecto con más detalle. De la misma forma, Wyszecki y Stiles (1982, apartado 5.6.1) ilustraron la influencia del envejecimiento del cristalino sobre las funciones de igualación de color.

¿Cómo se puede concretar el efecto? Si, por simplicidad, se toma el cristalino como un filtro homogéneo e isotrópico, y si se caracteriza el proceso de cambio en el cristalino envejecido como un aumento de su densidad derivado de un incremento de su grosor (Mellerio, 1971, citado en Mellerio, 1987), es posible aplicar la ley de Bouguer (Cline, Hofstetter y Griffin, 1997), según la cual:

$$T_{\lambda} = 10^{-\rho C_{\lambda}}, \quad (24)$$

donde T_{λ} es la transmitancia del filtro para la longitud de onda λ , C_{λ} es la absorción del filtro por unidad de longitud para la misma longitud de onda λ , y ρ es la longitud de filtro atravesada en la trayectoria de la luz, que sería el parámetro que cambia en función de la edad. De esta forma, se puede expresar la transmitancia del cristalino para una edad X en función de la del observador estándar, cuya edad se cifra en 25 años (recuérdese la relación entre transmitancia y densidad expresada en la ecuación (4)), de forma que

$$\begin{aligned} D_X(\lambda) &= F D_{25}(\lambda) \\ T_X(\lambda) &= T_{25}^F(\lambda) \end{aligned} \quad (25)$$

donde $D_X(\lambda)$ y $D_{25}(\lambda)$ son las densidades del cristalino para el observador de X años y el observador medio de 25 años respectivamente, $T_X(\lambda)$ y $T_{25}(\lambda)$ son las transmitancias correspondientes, y F es el factor que modifica la densidad óptica del cristalino, de manera que $F = 1$ para una edad de 25 años, edad a partir de la cual F aumenta. La ecuación (25) se utiliza frecuentemente en el estudio de la visión del color para derivar la densidad óptica de los medios oculares de observadores individuales y de grupos de observadores (véase la tabla III(2.4.6) de Wyszecki y Stiles, 1982), y de hecho no es más que un caso específico de la ley de Lambert (Wyszecki y Stiles, 1982). De hecho, el método propuesto por Norren y Vos (1974, véase el apartado 1.2.7), de uso habitual para estimar la densidad del cristalino de un observador concreto, parte del supuesto de que lo que varía entre observadores es el grosor de este y/o la concentración de pigmento presente en el mismo (más adelante volveremos sobre este tema).

Por tanto, partiendo de este supuesto, el problema de la caracterización de la transmitancia del cristalino envejecido se concreta en la estimación de la relación entre F y la edad. Existen varios estudios que proponen una relación cuantitativa para poder predecir el espectro de densidad (o el de transmitancia) del cristalino envejecido a partir de la edad. Coren y Girgus (1972) estudiaron cuantitativamente el aumento de la densidad del cristalino con la edad, a partir de la determinación experimental de pares de metámeros empleando colores de superficie, bajo el supuesto de que la densidad del cristalino influye sobre la determinación experimental de los metámeros (véase la ecuación (20)). Con una muestra de 265 observadores (147 varones y 118 mujeres), de edades comprendidas entre los 8 y los 79 años, y utilizando como espectro de transmitancia relativa del cristalino el derivado en el trabajo de Said y Weale (1959, citado en Coren y Girgus, 1972, p. 344), obtuvieron la siguiente función:

$$D = 10^{-4} A + (6 \times 10^{-5}) A^2 + 0,124 \quad (26)$$

donde D es la densidad óptica del cristalino para $\lambda = 490$ nm y A es la edad del observador en años. Esta función, ajustada por Coren y Girgus (1972) para que la densidad media del pigmento del cristalino del grupo de 20 años tenga un valor de 0,15, está representada en la Figura 3.8 mediante la línea curva formada por círculos. Los autores concluyeron que los datos obtenidos en su estudio, junto con otros datos existentes sobre la variación del grosor del cristalino en función de la edad, apoyaban la idea de que el proceso que subyace al progresivo amarillamiento del cristalino es el aumento en su grosor, permaneciendo estable la concentración del pigmento que contiene, lo que legitima la aplicación de la ley de Bouguer.

El método planteado por Coren y Girgus (1972) parte de la base de que el espectro de densidad del cristalino se puede computar a partir de una la multiplicación del espectro de densidad del cristalino del observador estándar por un escalar, tal y como indica la ecuación (25). Pokorny, Smith y Lutze (1987), tras poner en duda la validez de este método, propusieron un modelo según el cual la densidad óptica total del cristalino, T_L , resulta de la combinación de dos componentes, T_{L_1} y T_{L_2} , sólo el primero de los cuales varía en función de la edad (*componente de envejecimiento*), mientras que el segundo (*componente de crecimiento*) se desarrolla en las dos primeras décadas de

vida para permanecer después estable. El componente de envejecimiento también se computa en este caso a partir de la multiplicación de T_{L_1} por un escalar, de forma que la densidad óptica del cristalino, para un observador medio cuya edad esté comprendida entre los 20 y los 60 años, se calcula según la siguiente ecuación (Pokorny, Smith y Lutze, 1987, Smith y Pokorny, 2003):

$$T_L = T_{L_1} [1 + 0,02(A - 32)] + T_{L_2}, \quad (27.1)$$

donde A es la edad del observador en años, debiéndose emplear una ecuación diferente para edades mayores de 60 años, para dar cuenta de la aceleración en el proceso de amarillamiento que se observa a partir de esta edad:

$$T_L = T_{L_1} [1,56 + 0,0667(A - 60)] + T_{L_2} \quad (27.2)$$

Como puede observarse según las ecuaciones (27.1) y (27.2), el modelo propuesto por Pokorny, Smith y Lutze (1987) predice un crecimiento bilineal de la densidad del cristalino en el que pueden distinguirse dos fases, (antes y a partir de los 60 años). La representación gráfica de las ecuaciones (27.1) y (27.2), dentro del rango de edades indicado en cada caso, puede observarse en las líneas rectas continuas de la Figura 3.8, para $\lambda = 490$ nm.

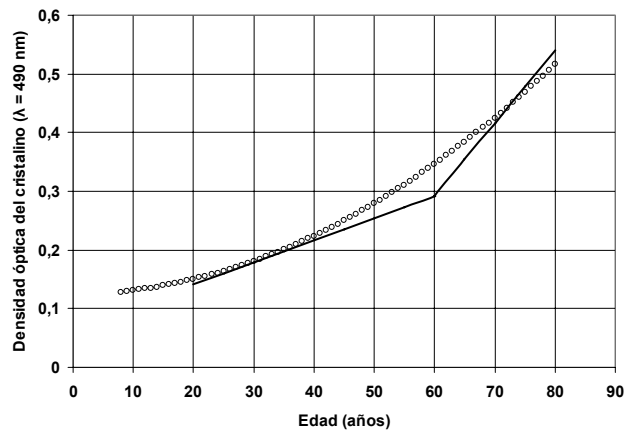


Figura 3.8. Densidad del cristalino y edad cronológica. Se muestra la densidad del cristalino (para $\lambda = 490$ nm) en función de la edad. Los círculos representan la ecuación polinomial (26) propuesta por Coren y Gircus (1972). Las líneas rectas representan las ecuaciones lineales (27.1) (para edades comprendidas entre los 20 y los 60 años) y (27.2) (para edades mayores de 60 años), propuestas por Pokorny, Smith y Lutze (1987). Más detalles en el texto.

Se ha elegido esta longitud de onda con el fin de facilitar la comparación con la función propuesta por Coren y Gircus (1972), de manera que el valor de densidad para T_{L_1} es igual a 0,187 a la edad de 32 años (véase la Tabla I de Pokorny, Smith y Lutze, 1987).

Uno de los aspectos más discutidos en este tipo de estudios es si el aumento de la densidad del cristalino en función de la edad cronológica es constante o por el contrario se acelera a medida que envejecemos. Como puede observarse en la Figura 3.8, la relación propuesta por Coren y Cirgus (1972) predice un crecimiento positivamente acelerado con la edad. Análogamente, Smith, Pokorny y Lutze (1987) optaron por incluir un incremento en la tasa de crecimiento a partir de los 60 años. Sin embargo, Smith y Pokorny (2003) señalan que la aceleración del aumento de la densidad característica de su trabajo de 1987 es propia del promedio de una muestra heterogénea, y no se ha visto replicada en varios estudios en los que el principio de cataratas ha sido criterio de exclusión (recuérdese el trabajo de la Johnson y Choy (1987)).

En la literatura especializada existen otras funciones que relacionan la densidad del cristalino con la edad obtenidas a partir de métodos no psicofísicos. Por ejemplo, Werner (1982), empleando una variante del método de Norren y Vos (1974) con una muestra de 50 observadores cuya edad variaba entre 1 mes y 70 años, y utilizando como variable dependiente la amplitud relativa de los potenciales corticales visuales evocados, llegó a la relación lineal $D_{400} = 0,0192A + 1,05$, donde D_{400} es la densidad del cristalino para $\lambda = 400$ nm y A es la edad del observador en años. Por su parte, Weale (1988), a partir de cristalinos extirpados concluyó que la densidad de este aumentaba exponencialmente con la edad.

En consonancia con lo explicado en el apartado 1.3.2.2, y teniendo en mente las ecuaciones (27.1) y (27.2), la utilidad de estas funciones se revela obvia a la hora de transformar los datos experimentales obtenidos para grupos de diferentes edades si no se posee información individualizada acerca de la densidad del cristalino de cada observador. Sin embargo, hay que recordar que así como el espectro de densidad estándar del cristalino se refiere a un *observador promedio*, el cambio sufrido con la edad en dicho espectro, cuantificado según las diferentes funciones indicadas, igualmente se refiere siempre a un promedio de observadores, puesto que la variabilidad dentro de un mismo grupo de edad es muy elevada. Por esta razón, del mismo modo que es inadecuado emplear el espectro de densidad estándar para corregir los datos de un solo observador (Wyszecki y Stiles, 1982), también es muy arriesgado emplear las

funciones propuestas para corregir los datos de un único observador en función de su edad (Werner, 1982; Pokorny, Smith y Lutze, 1987).

Un punto clave ampliamente discutido en el estudio del aumento de la densidad del cristalino con la edad ha sido la propia validez del supuesto según el cual la función de transmitancia del cristalino obedece la ley de Bouguer. Es de sobra conocido que el cristalino no es un filtro isotrópico, puesto que tiene un grosor mayor en el centro que en la periferia, por lo que la luz que atraviesa la córnea no sufre un filtrado uniforme a lo largo de todo el cristalino (Mellerio, 1987; Weale, 1991). En los trabajos sobre visión del color, este problema se resuelve de forma bastante precisa mediante la multiplicación del espectro de densidad estándar del cristalino por la constante adecuada en función del tamaño de la pupila, de forma que para tamaños menores de 3 mm de diámetro, el espectro de densidad del cristalino correspondiente a la pupila completa (> 7 mm de diámetro) ha de multiplicarse por 1,16 (Norren y Vos, 1974; Wyszecki y Stiles, 1982, Tabla 1.(2.4.6)).

Otro aspecto que afectaría a la validez de la aplicación de la ley de Bouguer, es si la densidad por unidad de longitud del cristalino se mantiene o no constante con la edad. Mellerio (1971, citado en Mellerio, 1987), a partir de material extirpado, cuantificó el aumento del grosor del cristalino asociado a la edad mediante la expresión $x_T = 0,024A + 3,83$, ($r = 0,71$), donde x_T es la longitud en mm del cristalino en mm y A la edad del sujeto en años, aportando pruebas de que la absorción por unidad de longitud se mantenía aproximadamente constante independientemente de la edad. Por esta razón no es de extrañar que estudios posteriores citen este trabajo, que justifica la aplicación de la ley de Bouguer (p. ej. Coren y Girgus, 1972; Norren y Vos, 1974; Werner, 1982; Pokorny, Smith y Lutze, 1987). Sin embargo, en un estudio realizado con 12 cristalinios provenientes de donantes de edades comprendidas entre los 26 y los 78 años, Mellerio (1987), contradiciendo las conclusiones a las que llegó en su trabajo anterior (Mellerio, 1971), aportó pruebas de que el aumento de la densidad del cristalino se debe a la combinación de dos factores, un aumento de grosor que se produce en la corteza del cristalino, x_c , reflejado mediante la ecuación $x_c = 0,022A + 0,16$, ($r = 0,56$), y un aumento de la concentración del pigmento observado en el núcleo, reflejado

mediante la ecuación $D_N / x_N = 0,016A - 0,205$, ($r = 0,917$), donde D_N/x_N es la densidad por unidad de longitud del núcleo y A es la edad en años.

El hecho de que el núcleo no aumenta de grosor mientras que sí lo hace la corteza ha sido replicado y hoy día se considera cierto. De hecho, Dubbelman, Van der Heijde, Weeber, y Vrensen (2003) ofrecen detalles acerca de qué partes concretas de la corteza del cristalino aumentan su grosor a medida que se envejece. De cualquier manera, e independientemente de la implementación fisiológica de los factores que producen un aumento de la densidad óptica del cristalino, trátase de un aumento de su grosor o de un aumento de la concentración del pigmento, puesto que ambos producen un efecto equivalente sobre la función de densidad, como se deriva, respectivamente, de las leyes de Bouguer y de Beer, (Wyszecki y Stiles, 1982), el método descrito por Norren y Vos (1974) se utiliza ampliamente a la hora de derivar el espectro de densidad del cristalino de un observador *in vivo*.

Así como el cristalino cambia con la edad, los datos apoyan la interpretación de que el *pigmento macular*, el otro pigmento no fotosensible que influye sobre los ajustes psicofísicos relacionados con la percepción del color (véase el apartado 1.2.7), se mantiene estable (Ruddock, 1972; Wyszecki y Stiles, 1982; Weale, 1988; Smith y Pokorny, 2003). Por ejemplo, Werner, Donnelly y Kliegl (1987), en un minucioso estudio realizado con 50 observadores de edades comprendidas entre los 10 y los 90 años de edad, en el que se determinó la densidad del pigmento macular (para $\lambda = 460$ nm) a partir de las diferencias en la sensibilidad espectral foveal y parafoveal, no observaron ningún incremento de la densidad asociado a la edad.

Existen estudios de simulación de los efectos que tiene un cristalino envejecido sobre la visión del color. Según Kaiser y Boynton (1996), y de acuerdo a la ecuación (20), “...El efecto es predominante óptico (...). La pérdida de discriminación es por tanto similar a la que el observador normal joven experimentaría si mirase a través de un filtro atenuante que mimetice la absorción prerreceptiva de la luz del ojo envejecido” (p. 460). Recientemente se está empleando el uso de filtros que mimetizan cada vez con más precisión las características de un cristalino envejecido (véase por ejemplo Obama, Ikeda, Sagawa y Shinoda, 2005). Pero ya Verriest (1963), en un

extenso trabajo realizado con 43 observadores (30 hombres y 13 mujeres) de edades comprendidas entre los 20 y los 25 años, empleó una serie de ocho filtros para simular los efectos de un cristalino envejecido sobre la ejecución de diferentes tipos de tests de visión del color, llegando a las siguientes conclusiones:

1. La disminución de la discriminación cromática causada por el uso de filtros que absorben selectivamente longitud de onda corta simula aquella asociada al envejecimiento y a la alteración del color congénita de tipo tritán.
2. El defecto tritán causado por la reducción de la iluminancia retiniana no es tan acusado como el que se produce por una absorción selectiva de longitudes de onda corta.
3. El uso de anomaloscopios muestra un aumento de la cantidad de primario de longitud de onda más corta para efectuar la mezcla, así como un aumento en el rango de confusión.

Hoy día existen pruebas acerca de la importancia que tiene la oxidación en la aceleración de los procesos de amarillamiento del cristalino, así como datos que avalan la hipótesis de que factores fotoquímicos derivados de la exposición prolongada a la radiación ultravioleta pueden influir en este proceso. Entre los mecanismos de protección con que cuenta la retina para protegerse de estos daños destacan la existencia de moléculas antioxidantes, la regeneración celular, y la absorción selectiva de longitudes de onda corta (Werner, 1998).

Queda claro pues que tanto la cantidad de luz como la distribución de energía radiante que llega a la retina sufre cambios significativos con la edad. A continuación se describen diferentes investigaciones que pretenden especificar los cambios que sufren diferentes aspectos de la visión del color con el envejecimiento. Es de vital importancia recalcar que, a no ser que (1) se controlen experimentalmente, o (2) su efecto sea descontado de los resultados, los factores ópticos (miosis senil y densidad óptica del cristalino) pueden contaminar las conclusiones de cualquier estudio realizado con personas de edad avanzada. Por ejemplo, el deterioro observado podría atribuirse erróneamente a factores retinianos o incluso a niveles superiores de procesamiento (recuérdese la hipótesis de trabajo propuesta por Weale, 1991). En breve, el control experimental de los factores ópticos pasa por descontar los efectos de:

- *La miosis pupilar.* Sus efectos pueden eliminarse trabajando con pupilas artificiales o bajo condiciones de observación conocidas como “maxwellianas”, de manera que, mientras el observador fija su mirada en un punto, la estimulación visual, al pasar a través de la pupila, nunca excede su tamaño mínimo (unos 2 mm de diámetro) (Kaiser y Boynton, 1996). En el otro extremo, puede recurrirse al empleo de sustancias que producen artificialmente una dilatación pupilar máxima. Alternativamente, se puede calcular la reducción en iluminancia retiniana que causa la miosis senil a una determinada edad, o trabajar directamente con unidades de iluminancia retiniana, como el Td (troland).
- *La absorción pre-retiniana.* La forma más habitual de controlar esta variable es igualar la iluminancia retiniana de los estímulos que se van a emplear en el experimento, de manera individual para cada observador, mediante el uso de la fotometría heterocromática de fluctuación (llevado a su extremo, se puede determinar la función de sensibilidad espectral de cada observador mediante FHF, véase Kaiser, 1988). Alternativamente, se pueden corregir los resultados experimentales a partir del conocimiento de la densidad óptica de los medios oculares (la corrección puede ser individual, si se estima la densidad del cristalino para cada observador, o grupal, recurriendo a las funciones existentes en la literatura sobre el aumento de la densidad del cristalino con la edad). También es importante destacar la importancia del uso de un grupo de control formado por observadores afáquicos (observadores cuyo cristalino ha sido extraído) unilaterales o bilaterales, para investigar los cambios a nivel retiniano.

Por último, también es conveniente recordar que las tareas utilizadas no deben exigir grandes recursos cognitivos, para evitar la posible influencia de estos en los resultados.

Cambios en la sensibilidad espectral asociados al envejecimiento

Cualquier determinación experimental de la sensibilidad espectral reflejará el aumento de la densidad del cristalino con la edad. Como ya se describió en el apartado 1.2.7, el método más empleado en psicofísica visual para estimar la densidad del cristalino de un observador es precisamente la comparación de la sensibilidad escotópica de aquél con la función oficial $V'(\lambda)$ (después de normalizar ambas funciones en la región de las longitudes de onda larga). Ahora bien, ¿existen cambios en la sensibilidad escotópica aparte de los debidos al aumento de la densidad del cristalino? Jackson, Owsley, Cordle y Finley (1998) mostraron un decremento significativo (0,51 unidades log ante un estímulo de 450 nm) para los observadores de mayor edad (70 años de media frente a 27), que resultó ser independiente de la excentricidad retiniana. Puesto que los factores ópticos estaban descartados, ya que se controló el tamaño pupilar y se estimó la densidad del cristalino de cada observador con el fin de descontar su efecto en la medida de la sensibilidad, los autores concluyeron que la causa de esta reducción se debía a factores retinianos. Por lo tanto, parte de las dificultades de la vida diaria que sufren personas mayores bajo visión nocturna, tales como la detección y el reconocimiento de objetos, podrían deberse al efecto combinado de la mayor densidad del cristalino y de la pérdida de sensibilidad espectral escotópica.

Como ya se ha esbozado anteriormente, el patrón de cambio en la función de sensibilidad espectral fotópica asociado a la edad se manifiesta por un decremento de la sensibilidad espectral relativa ante las longitudes de onda corta, acompañado de un incremento relativo de la eficiencia espectral de las de onda larga (Le Grand, 1972). Este patrón es consistente con el aumento de la densidad del cristalino envejecido: en comparación con la absorción sufrida por el estímulo de referencia, los estímulos de longitud de onda corta sufren una absorción mayor, mientras que los estímulos de longitud de onda larga sufren una absorción menor.

Sin embargo, puesto que “...Existen muchos estudios que han revelado cambios fisiológicos y sensoriales del sistema visual humano relacionados con la edad (...), pero las consecuencias perceptivas de estos cambios no se conocen bien” (Kraft y Werner, 1994, p. 1213), cabe preguntarse si a pesar del aumento de la densidad del cristalino, cambia el brillo percibido de los estímulos espectrales. Con el objetivo de responder a

esta pregunta, Kraft y Werner (1994) compararon los cambios sufridos con la edad en la función de sensibilidad espectral determinada según el método de fotometría heterocromática de fluctuación (FHF) con los sufridos en la función de sensibilidad espectral derivada del método de igualación heterocromática de brillo (IHB) (véase el apartado 1.2.2).

Los resultados indicaron que mientras la función de eficiencia espectral determinada mediante FHF manifestaba un decremento progresivo para las longitudes de onda corta y un ligero aumento para las de onda larga, ambos consistentes con el incremento de la densidad del cristalino, la función de sensibilidad determinada según el método de IHB sufrió cambios menores (concretamente, un decremento de menor magnitud para las longitudes de onda corta y ningún decremento para las longitudes de onda larga), manteniéndose por tanto más constante a lo largo del rango de edad evaluado, lo cual se interpretó como una compensación del sistema visual ante los cambios de carácter óptico asociados con el envejecimiento, que permite que la percepción del brillo de los estímulos espectrales no se vea tan afectada a lo largo del ciclo vital. La compensación estaba relacionada con la edad (0,052 unidades log por década), y se concretó en un aumento uniforme del brillo espectral corregido a nivel retiniano en el rango de 420-560 nm, dentro del cual se mostró independiente de la longitud de onda.

Sagawa y Takahashi (2001), con el doble fin de concretar los cambios que sufre la FEE con la edad y establecer así las bases para el desarrollo de un sistema fotométrico que refleje dichos cambios (a partir de los resultados encontrados, los autores propusieron un método para estimar las funciones de sensibilidad espectral determinadas según los métodos de FHF y de IHB), evaluaron la sensibilidad espectral fotópica de un total de 99 observadores con visión normal del color. Los resultados obtenidos con el método de FHF replicaron los encontrados por Werner y Kraft (1994), reflejando cambios consistentes con el envejecimiento del cristalino. Sin embargo estos cambios sólo explicaban en parte los sufridos en la función de sensibilidad espectral determinada según el método de IHB, que (en contra de los resultados de Kraft y Werner, 1994) mostró una progresiva reducción de eficiencia para longitudes de onda larga. Los autores señalaron como responsable de este cambio a una pérdida de contribución de los canales cromáticos al brillo percibido. Curiosamente, a pesar de esta

hipotética pérdida y del aumento de la densidad del cristalino con la edad, y de manera similar a lo que encontraron Kraft y Werner (1994), el decremento en la región de longitudes de onda corta no fue mayor para la función determinada mediante IHB que para la determinada según la FHF. Sagawa y Takahashi (2001) no fueron capaces de explicar por qué la supuesta pérdida de contribución de los canales cromáticos al brillo con la edad fue mayor para las longitudes de onda larga. Siguiendo a Kraft y Werner (1994), esta paradoja estaría motivada por la compensación con la que el sistema visual amortigua en esta zona espectral los efectos del amarillamiento del cristalino.

Un aspecto de importancia capital para entender los posibles cambios de la visión del color, hace referencia a la sensibilidad de cada tipo de cono, puesto que la primera etapa en la codificación del color es la activación relativa de los tres tipos de conos. Si uno de estos muestra un deterioro selectivo con la edad, es de esperar que este influya en la visión del color. Por ejemplo, Weale (1991) remarcaba que a pesar de la demostración a nivel fisiológico de una reducción en la densidad de los fotorreceptores, no puede concluirse un cambio en la visión del color hasta que no se especifique el efecto producido en cada tipo de cono.

Werner y Steele (1988) evaluaron la sensibilidad de los tres “mecanismos de los conos”²⁰. Los resultados mostraron que con la edad existe un decremento lineal de la sensibilidad (medida en unidades logarítmicas) de estos mecanismos cromáticos, más allá de lo esperable a partir del aumento de la densidad del cristalino. Debido a las características del estudio, Werner y Steele (1988) no pudieron concluir si el decremento en sensibilidad observado se debió a un deterioro en los propios receptores o a las vías que reciben la información de estos. El decremento de la sensibilidad de los tres “mecanismos cromáticos”, especificado en la córnea, resultó ser prácticamente equivalente (sólo ligeramente superior para los conos S), lo que supone, como mostraron los autores mediante la corrección pertinente de los resultados para descontar el efecto del filtrado del cristalino, que el decremento a nivel retiniano era incluso menor para los conos S (0,08 unidades log por década, para $\lambda = 440$ nm) que para los M

²⁰ π_1 , π_4 y π_5 , los tres mecanismos π de Stiles determinados mediante la técnica del incremento de los umbrales que más se asemejan a los fundamentales de los conos S, M y L respectivamente. En esta técnica, se estima (a partir de la determinación de umbrales incrementales) la sensibilidad espectral de un mecanismo cromático ante una serie de estímulos espectrales, presentados sobre un fondo adaptador de características colorimétricas elegidas para potenciar la adaptación selectiva de los mecanismos cromáticos restantes.

y los L, que mostraron una pérdida semejante (0,11 unidades log por década, para $\lambda = 560$ nm). Esta pérdida casi-paralela permite, en opinión de los autores, mantener la constancia en la activación relativa de los tres tipos de conos, lo que les llevó a cuestionarse si la pérdida de discriminación cromática de tipo tritán asociada a la edad se debía a un decremento selectivo de los conos S o por el contrario a una reducción global (no dependiente de la longitud de onda) de la intensidad de la señal retiniana (recuérdense los efectos de la reducción de la iluminación en la ejecución de tests de visión del color puestos de manifiesto por Knoblauch et al., 1987).

Cambios en la discriminación cromática asociados al envejecimiento

Como vimos al principio de este apartado, los trabajos clásicos realizados con tests de discriminación cromática bajo condiciones normales de observación (véase Verriest, 1963; Knoblauch et al., 1987) pusieron de manifiesto la progresiva aparición de un comportamiento de tipo tritán asociado a la edad. En un estudio sobre la readaptación de los mecanismos cromáticos después de una operación de cataratas, Delahunt, Webster, Ma, y Werner (2005) mostraron cómo los umbrales de discriminación cromática (en torno al punto acromático), obtenidos con pacientes de cataratas, mostraron una evidente pérdida de discriminación a lo largo la línea tritán, pero volvieron a la normalidad súbitamente al día siguiente de la operación.

Scheffrin, Shinomori y Werner (1995) llevaron a cabo un estudio para determinar si parte del deterioro de la discriminación cromática puede deberse a la existencia de factores no ópticos (más allá por tanto de la miosis pupilar y el aumento de la densidad del cristalino). Igualando la iluminancia retiniana de los estímulos espectrales presentados (120 Td para $\lambda = 560$ nm) y presentando los estímulos bajo visión maxwelliana, controlaron los cambios ópticos asociados al envejecimiento. Encontraron que el comportamiento de los umbrales de discriminación cromática a lo largo de los ejes de un espacio cromático del tipo de McLeod y Boynton (1979), esto es, una línea tritán y una línea de S constante (véase la Figura 3.9), dependían del nivel de activación de los conos implicados. A niveles bajos de activación (≤ 100 Td S para la línea tritán; 80 Td L para la línea de S constante), existió un decremento lineal (medido en unidades logarítmicas) de la discriminación cromática en función de la edad (en torno a 0,1 unidad log por década), pero este desapareció a niveles más altos.

Aplicando un modelo de discriminación cromática a lo largo de las líneas tritán (a partir de Boynton y Kambe, 1980), infirieron que la causa de este deterioro era bien una incapacidad de los fotorreceptores para responder ante la luz incidente, bien un incremento del ruido neural, o bien una combinación de ambos factores, pero no un cambio en la fracción de Weber (0,17 aproximadamente), que describe el comportamiento de la discriminación cromática a niveles de intensidad mayores (véase la Figura 3.9). Poniendo en relación su trabajo con los estudios clásicos sobre discriminación de tono (Verriest, 1963, Knoblauch et al., 1987), concluyeron que el efecto de este fenómeno era análogo al de la reducción de iluminancia a la hora de evaluar la visión del color mediante tests de uso convencional. Concretamente, para una iluminancia menor de 180 lx o en torno a este nivel (que se viene a corresponder con una activación media de unos 100 S Td para las muestras cromáticas que caen a lo largo de los ejes tritán en el FM-100 Hue test empleado en los estudios clásicos citados), es de esperar que parte del comportamiento tritán exhibido por los observadores se deba a un deterioro en la vía de discriminación cromática, y no únicamente a factores ópticos.

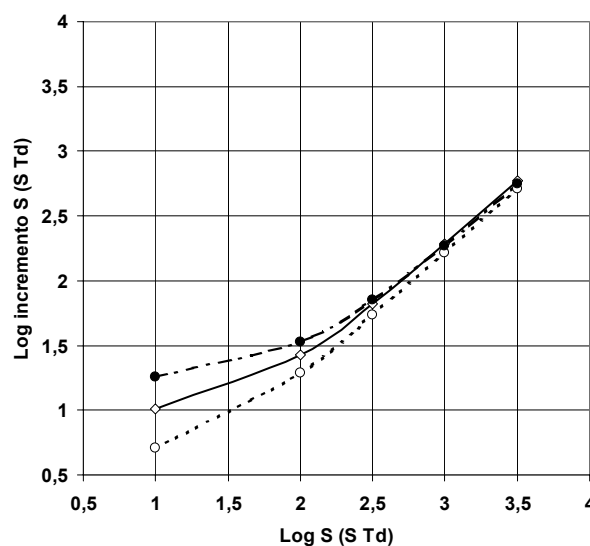


Figura 3.9. Umbrales de discriminación cromática a lo largo de una línea tritán en función del nivel de activación de los conos S. Mientras que la porción lineal de las curvas se ajusta a la ley de Weber, a niveles bajos de activación de los conos S no se cumple dicha ley. Cada curva representa la media de los umbrales obtenidos para observadores de diferente edad: 22-30 años (círculos blancos y línea discontinua), 39-55 años (rombos y línea continua), y 59-77 años (círculos negros y línea discontinua). A partir de la ecuación (1) y los parámetros de la Tabla 3 de Scheffrin, Shinomori y Werner (1995).

Shinomori, Scheffrin y Werner (2001), en un intento de concretar los efectos de la edad sobre la discriminación cromática, ampliaron el trabajo de Scheffrin, Shinomori y Werner (1995) estudiando el deterioro de la discriminación de la longitud de onda a una intensidad de 10 td (para $\lambda = 570$), y previa igualación de la iluminancia retiniana. Los resultados mostraron una pequeña pero consistente elevación de los umbrales de discriminación cromática en los observadores mayores, y puesto que la iluminancia retiniana había sido controlada, la causa de esta elevación debía ser de naturaleza receptiva o neural. Aplicando un modelo de discriminación cromática basado en la respuesta de los dos canales mencionados anteriormente (derivado nuevamente a partir de Boynton y Kambe, 1980), infirieron que, para el mecanismo mediado por la respuesta de los conos S, la fracción de Weber se mantenía constante a pesar de la edad ($W = 0,096$), replicando el resultado hallado en Scheffrin, Shinomori y Werner (1995) (véase la Figura 3.9), pero por el contrario infirieron un aumento significativo de la fracción de Weber en el canal oponente cromático L/M para el grupo de mayor edad (0,12 frente a 0,044).

En resumen, los resultados encontrados indican que, en personas mayores, la discriminación basada en la actividad diferencial de los conos S requiere niveles de intensidad elevados (para evitar los efectos perjudiciales del aumento del ruido), pero que en estos niveles (donde los resultados de la discriminación cromática están gobernados por la ley de Weber) el umbral diferencial no es mayor que el de las personas jóvenes. No parece suceder lo mismo cuando la discriminación está mediada por el canal oponente L/M, para el que los observadores de más edad requieren incrementos mayores que las personas jóvenes.

En un trabajo resumido en dos publicaciones contiguas, Kraft y Werner (1999a, 1999b) estudiaron el cambio sufrido con la edad en la saturación del color. El estudio de Kraft y Werner (1999b), puesto que se centra en el escalamiento subjetivo de la saturación, se tratará bajo el siguiente epígrafe. Kraft y Werner (1999a) estudiaron el deterioro de la capacidad de discriminación de la pureza colorimétrica asociado a la edad. Encontraron que existía un declive aproximadamente constante a lo largo de todo el espectro visible, siendo más acusado a niveles bajos de iluminancia retiniana (10 td) que a niveles más altos (250 td). Por ejemplo, el máximo deterioro se encontró para el grupo de mayor edad ante $\lambda = 570$ nm a 10 td, lo que manifiesta una discriminación

muy debilitada a lo largo de la línea tritán que pasa por el punto acromático (véanse la Tabla 3.2 y la Figura 3.6) a niveles bajos de intensidad. Aplicando un modelo de discriminación cromática según el cual se combinan las respuestas de dos mecanismos cromáticos (uno dependiente de la respuesta de los conos S, y otro dependiente de la comparación de las respuestas de los conos L y M), concluyeron que existía un deterioro paralelo en la sensibilidad de ambas vías de discriminación cromática, y que este era más acusado a niveles bajos de iluminancia retiniana (unas 0,08 unidades log por década a 10 td, frente a unas 0,045 a 250 td). Además, la reducción de la iluminancia retiniana perjudicaba especialmente la discriminación dependiente de los conos S, independientemente de la edad. Puesto que los factores ópticos habían sido controlados en el experimento, concluyeron que la posible causa del deterioro encontrado estaba, en consonancia con los resultados de Werner y Steele (1988), en un deterioro paralelo de los tres tipos de conos. Como consecuencia, es de esperar que en condiciones naturales de observación las personas mayores tengan dificultades para distinguir estímulos de baja pureza colorimétrica del punto acromático, las cuales se revelarán tanto mayores cuanto menor sea el nivel de iluminación, especialmente cuando se requiera la intervención del mecanismo cromático mediado por los conos S.

Aunque muy brevemente, también comentaremos que la sensibilidad espacial al contraste cromático también se ve reducida con la edad. Hardy, Delahunt, Okajima y Werner (2005) estudiaron la FSCC foveal, empleando estímulos modulados espacialmente a diferentes frecuencias (0,5, 1, 2 y 4 c/°) a lo largo de los ejes tritán y de S constante, mostraron que dicha reducción no se debía exclusivamente a factores ópticos, sino que además existía un deterioro a otros niveles del procesamiento visual. Sin embargo, los factores ópticos tienen poca influencia sobre la resolución periférica, hecho que se puede aprovechar para diagnosticar diferentes enfermedades visuales incipientes que comienzan a manifestarse mediante un deterioro del eje cromático Az-Am (Anderson et al., 2003; Zlatkova et al., 2003).

Cambios en la apariencia del color asociados al envejecimiento

En la sección sobre *Cambios en la sensibilidad espectral asociados al envejecimiento* ya se han comentado los cambios sufridos en el brillo de los estímulos espectrales (Kraft y Werner, 1994; Sagawa y Takahashi, 2001).

Scheffrin y Werner (1990) estudiaron si existían cambios en los tonos únicos espectrales (amarillo, azul y verde) en función de la edad en condiciones naturales de observación. A diferencia de estudios anteriores, en esta ocasión los estímulos eran equiluminantes según la función oficial de eficiencia espectral, $V(\lambda)$, por lo que no se compensó el aumento de la densidad del cristalino asociado a la edad. Partiendo del comportamiento experimental exhibido por los mecanismos R-V y Am-Az, concretamente del hecho de que el primero obedece la propiedad de escala, y por tanto la localización espectral de los tonos únicos asociados con el equilibrio de este mecanismo, esto es, el amarillo y el azul únicos, no varían en función de la intensidad estimular, predijeron que la edad no tendría ningún efecto en la determinación experimental de estos tonos, puesto que, por una parte, los efectos de un filtro lineal no afectan la composición espectral de estímulos monocromáticos, sino únicamente su intensidad, y por otra parte Werner y Steele (1988) mostraron que, a nivel de córnea, existía un deterioro paralelo de los tres tipos de conos con la edad.

Efectivamente, no hubo cambios debidos ni a la intensidad ni a la edad en la localización de los tonos únicos amarillo (en torno a 577,5 nm) ni azul (en torno a 480 nm). Por el contrario, sí se registró un cambio hacia longitudes de onda corta para el verde único, tanto a mayores luminancias (505,3 nm al nivel más bajo; 507,6 al intermedio; 510,3 al más alto) como a mayor edad (reflejado en un cambio de 1,47 y 2,1 nm por década para los niveles de intensidad alto e intermedio respectivamente). Los autores interpretaron que estos resultados eran coherentes con la existencia de un declive paralelo de la contribución de los tres tipos de conos al mecanismo R-V, y con un declive selectivo de la contribución de los conos S al canal Az-Am (o tal vez un cambio en la forma en que se combinan las respuestas de los conos para dar lugar a este canal).

Werner y Scheffrin (1993) investigaron si el punto acromático variaba en función de la edad. Para ello determinaron la proporción de dos primarios complementarios necesaria para eliminar cualquier resto de tono. En el experimento principal, los primarios empleados fueron el amarillo y el azul únicos (determinados individualmente para cada observador). Los resultados mostraron que, a pesar de que no se compensó el aumento de la densidad del cristalino (los estímulos eran equiluminantes según $V(\lambda)$), y por lo tanto el primario azul fue absorbido en mayor proporción en los observadores de más edad, no se registraron cambios en la cromaticidad del punto acromático así determinado a lo largo del ciclo vital ($x = 0,31$, $y = 0,31$ o $u' = 0,21$, $v' = 0,46$). Como comprobación de la estabilidad de la cromaticidad del punto acromático, se repitió el experimento empleando otro par de estímulos complementarios (600 nm y el complementario de onda corta correspondiente a partir de los resultados del experimento principal), encontrándose resultados análogos. Sin embargo, los autores insistieron en que, con toda seguridad, eligiendo otro par diferente de longitudes de onda complementarias, el punto acromático sí hubiese cambiado, puesto que el aumento de la densidad del cristalino altera la forma de los espectros de acción de los fotorreceptores a nivel de córnea.

Partiendo de un modelo según el cual la percepción del punto acromático se deriva de la activación equitativa de los tres tipos de conos, la constancia del punto acromático sería esperable si, como consecuencia de un proceso de compensación del sistema visual ante el envejecimiento del cristalino (Werner, 1982), la tasa de deterioro de los tres tipos de conos (medida a nivel de córnea) fuese paralela (Werner y Steele, 1988). Los autores lanzaron la hipótesis de que tal compensación ayudaría a mantener la constancia de la percepción del color a lo largo del ciclo vital. En concreto, la propuesta que formularon para dar cuenta de los resultados fue la siguiente: a pesar de que el amarillamiento del cristalino causa que el espacio de color se distorsione, desde un punto de vista teórico es posible mantener casi constante la localización espectral del amarillo y del azul únicos, simplemente reescalando el peso relativo de los conos para que ante un estímulo equienergético la respuesta de estos siga siendo equivalente (manteniéndose así constante la cromaticidad del punto acromático).

Este mecanismo de compensación sería pues similar a un mecanismo de adaptación tipo von Kries, según el cual el peso con el que los tres tipos de conos

contribuyen a la activación de los canales cromáticos está inversamente relacionado con su nivel de respuesta ante un estímulo adaptador, pero por supuesto actuaría mucho más a largo plazo. En el contexto del envejecimiento, se ajustaría el peso de los conos de forma que ante los iluminantes naturales (de banda ancha) los conos respondieran con un patrón similar al que existía antes del amarillamiento del cristalino.

Como se indicó anteriormente, los observadores afáquicos (cuyo cristalino ha sido extraído) son de gran valor a la hora de estudiar los cambios asociados al envejecimiento. Delahunt, Webster, Ma, y Werner (2005) llevaron a cabo un estudio longitudinal para concretar los cambios en la cromaticidad del punto acromático en observadores que habían sido operados de cataratas (el cristalino fue reemplazado por lentes intraoculares). Los observadores ajustaron la cromaticidad de la estimulación presentada mediante un monitor CRT (a 32 cd/m²) antes y varias ocasiones después de la operación durante un periodo de 6 meses (3 observadores) o un año (1 observador). Se observó un cambio inicial muy acusado en los ajustes del punto acromático en el diagrama de cromaticidad hacia la dirección del amarillo, que de forma gradual, pero nunca completamente, retornó al punto previo a la cirugía. El curso de la readaptación (cuantificado como la distancia euclidiana en el diagrama de cromaticidad xy al punto correspondiente al ajuste previo a la operación) siguió una curva exponencial: comenzó rápidamente después de la operación, para estabilizarse casi por completo dentro de los tres meses posteriores a la cirugía.

Intentando esclarecer los mecanismos de esta readaptación, los autores comprobaron que era de carácter monocular, puesto que el seguimiento de los ajustes del punto acromático realizados por uno de los observadores empleando el otro ojo, cuyo cristalino había sido extraído ocho meses antes, mostró un comportamiento constante e independiente de la readaptación del ojo recién operado. Además, probablemente, debido a la lentitud del proceso de readaptación, los autores especularon que esta se debía a un mecanismo localizado a nivel cortical, que permite una constancia del color a largo plazo.

Kraft y Werner (1999b) estudiaron el cambio en la saturación percibida de estímulos cromáticos. El deterioro de la capacidad de discriminación de la pureza colorimétrica asociado a la edad mostrado en su trabajo previo (Kraft y Werner, 1999a)

dejaba abierta la cuestión de si el sistema visual era capaz de compensar el posible cambio de apariencia de estímulos poco saturados. Se crearon dos conjuntos de estímulos espectrales, uno de ellos formado por estímulos equiluminantes según la función oficial $V_M(\lambda)$, y otro constituido por estímulos cuya iluminancia retiniana había sido previamente igualada para cada observador. La tarea de los observadores era escalar la proporción de contenido cromático de los estímulos presentados, obtenidos mezclando un estímulo acromático de banda ancha con cada uno de los estímulos espectrales del primer o del segundo conjunto. La lógica para interpretar los resultados era la siguiente: si existiera una compensación perfecta, entonces la percepción de los estímulos equiluminantes según la función oficial $V_M(\lambda)$ debería ser constante a lo largo del ciclo vital, y a la vez, la saturación percibida de los estímulos igualados en iluminancia retiniana debería ser mayor para los observadores de mayor edad. En el otro extremo, de no existir compensación en absoluto, el patrón de resultados indicaría, por un lado, una menor saturación percibida para los observadores mayores ante los estímulos equiluminantes según $V_M(\lambda)$, y una saturación igual para ambos grupos de observadores en el caso de los estímulos igualados en iluminancia retiniana.

Los resultados (previa normalización a longitudes de onda largas, 640-700 nm) mostraron que no existieron diferencias significativas entre las proporciones de contenido cromático asignadas por los dos grupos de observadores en ninguna de las dos condiciones (con los estímulos igualados en luminancia o en iluminancia retiniana). Un análisis más detallado de los resultados obtenidos para la saturación de los estímulos de longitud de onda dominante corta, en función de la densidad ocular estimada, ofreció un patrón más complejo, puesto que sí que se produjo una compensación clara, pero hasta un límite: el grupo de mayor densidad ocular ($> 1,25$ para $\lambda = 420$ nm, que según el modelo de Smith, Pokorny y Lutze, 1987, se correspondería con una edad media de aproximadamente 70 años) no fue capaz de compensar la pérdida de energía ante longitudes de onda cortas. Sin embargo, para densidades oculares medias (entre 0,5 y 1,25) y bajas ($< 0,5$), el patrón de resultados fue muy similar al predicho si existiese una compensación del sistema visual como respuesta ante los cambios en la densidad del cristalino. Como sucediera en el estudio sobre la percepción del brillo de estímulos espectrales (Kraft y Werner, 1994), la compensación resultó tener un carácter uniforme, de manera que para mantener aproximadamente constante la saturación de estímulos de longitud de onda dominante corta, la saturación de estímulos de longitudes de onda

dominante medias (500-550 nm) se ve “sobrecompensada” (cuando los estímulos están igualados a nivel de córnea, los observadores con densidad ocular media y alta perciben estos estímulos como más saturados que los de observadores con cristalinos más transparentes).

Parece claro pues que el sistema visual compensa, parcialmente al menos, las consecuencias derivadas del envejecimiento del cristalino envejecido, de forma que, hasta un límite, facilita la constancia del color a lo largo del ciclo vital. Pero los mecanismos mediante los cuales se consigue esta constancia no están muy claros. Sin embargo es muy ilustrativo conocer los límites de esta compensación. Está claro que una compensación perfecta es imposible, puesto que *“requeriría una función que fuese exactamente la inversa de la absorción espectral de los medios oculares. Sin embargo, la información precisa sobre la longitud de onda se pierde en el proceso de transducción, por lo que no se puede construir una función modificadora espectral arbitraria, y el sistema visual no puede compensar con exactitud el envejecimiento del cristalino”* (Kraft y Werner, 1994, p. 1220). Esto es, dadas las características del aumento de la densidad del cristalino, que modifica los espectros de acción de los conos (especificados a nivel de la córnea), de un lado, y el principio de univarianza y el solapamiento espectral de los tres tipos de conos de la retina humana por otro, se deduce que una compensación perfecta ante los cambios sufridos en el cristalino es imposible.

¿Cómo puede entonces lograrse una compensación parcial? Parece que un ajuste de los pesos relativos de los conos en su contribución a los mecanismos cromáticos podría ser un elemento fundamental en pos de compensar el paulatino cambio en la distribución de radiancia energética que llega a la retina. Neitz, Carroll, Yamaguchi, Neitz y Williams (2002), en un importante trabajo sugirieron que *“...la visión del color podría proporcionar el primer ejemplo en el que es posible demostrar que la información de la experiencia se utiliza activamente para guiar la función neural que subyace a una capacidad sensorial básica”* (p. 783) (desde hace mucho tiempo se sabe que la experiencia es necesaria para el desarrollo de las conexiones neuronales que subyacen a la visión, pero el debate sobre si lo es simplemente para mantener el funcionamiento, posibilitando así el desarrollo del programa genético, o por el contrario la información extraída de la experiencia se usa de forma activa en el desarrollo del sistema visual ha sido muy acalorado y hoy día sigue abierto, de ahí la contundencia

con la que los autores presentaron los resultados obtenidos en su trabajo). En una serie de cuatro experimentos, y basándose fundamentalmente en los resultados sobre la localización espectral del amarillo único, interpretado como el equilibrio de la activación de los conos L y M, mostraron que los pesos relativos de estos dos tipos de conos pueden alterarse a lo largo del desarrollo (más allá del proceso madurativo, por tanto):

1. En un primer experimento realizado con 32 observadores (14 mujeres, 18 hombres), se demostró la ausencia de correlación entre la ratio L:M y la localización espectral del amarillo único. Los autores recurrieron a la que denominaron “hipótesis de la normalización”, según la cual se produce un ajuste de los pesos relativos de la entrada de los conos al canal cromático R/V, para explicar este resultado.
2. En un segundo experimento (4 observadores, 3 hombres y 1 mujer) se comprobó que la manipulación experimental de la distribución de la energía radiante que llega a la retina durante varias horas al día era suficiente para conseguir un cambio en la localización espectral del amarillo único.
3. Mediante un tercer experimento se intentó localizar el lugar de la adaptación. Puesto que la manipulación experimental del segundo experimento no produjo ningún cambio apreciable en el ERG (electrorretinograma), y la manipulación exclusivamente monocular del patrón de radiancia influyó sobre los ajustes realizados con el otro ojo, se infirió que el locus de la adaptación era cortical.
4. Finalmente, con un grupo de cinco observadores adultos deuteranómalos (que, recuérdese, carecen de fotorpigmento M, y poseen fotorpigmento L y una variante de este mismo fotorpigmento), se comprobó una alteración en los pesos de los conos al combinarse para dar lugar al canal cromático R/V.

La interpretación de todos estos resultados fue la siguiente: el patrón medio de la luz ambiental que llega a la retina altera el peso relativo de los conos, calibrándolo de forma similar a un mecanismo de adaptación de tipo von Kries. La localización espectral del amarillo único es simplemente una consecuencia de esta normalización.

1.3.3. CONSECUENCIAS LABORALES DE LAS ALTERACIONES DE LA VISIÓN DEL COLOR

Las consecuencias laborales que puede acarrear una alteración de la percepción del color están íntimamente ligadas a dos aspectos: la reproducción exacta del color, y el uso del color como herramienta para codificar la información. Este último es especialmente importante en situaciones en las que pueda haber consecuencias para la seguridad de los usuarios y de los trabajadores (IEE, 2004). Quizá el primer trabajo recogido en el que se relacionan las deficiencias en la visión del color y sus consecuencias laborales sea el trabajo de Huddart (1777, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 452), que describió los problemas laborales sufridos por Harris, un zapatero de Cumberland (véase el apartado de introducción histórica). En trabajos posteriores aumentó progresivamente el número de citas de profesiones en las que existían situaciones laborales problemáticas debido a la identificación errónea de colores, citándose entre otras profesiones tan variadas como encuadernador de libros, arquitecto, tejedor, físico, funcionario de correos, o granjero (Jeffries, 1883, citado en Fletcher y Voke, 1985, p. 452).

Puesto que las consecuencias laborales derivadas de una visión deficitaria del color pueden variar, en consonancia también existen diferentes listados orientativos de profesiones con el objetivo de agrupar aquéllas en las que una visión normal del color 1) es deseable, 2) recomendable o 3) necesaria, en el sentido de que un error en la identificación del color pudiera tener consecuencias graves. La Tabla 3.12 muestra este último aspecto, recogiendo las profesiones habitualmente citadas como aquellas para las que se requiere una visión normal del color. Como conclusiones generales del estudio de las alteraciones cromáticas en contextos laborales, pueden extraerse las siguientes:

1. Debe existir una *sintonía entre el nivel de exigencia del puesto con respecto a la capacidad de discriminación cromática y la gravedad de las consecuencias derivables de una identificación errónea del color*. Birch (1993, capítulo 11, véanse especialmente las Tablas 11.2 y 11.3), junto con una guía de tests pseudoisocromáticos (véase el apartado de *Diagnóstico*) para emplear en cada caso, distingue entre:

Tabla 3.12. Profesiones en las que se requiere una visión normal del color. Mediante una X se indica que la profesión correspondiente viene recogida en la fuente bibliográfica señalada.

		Fletcher y Voke (1985; Tabla 11.3)	Birch (1993; Tabla 11.1a)	IEE (2004; Figura 1)
Fuerzas Armadas	Oficiales de Marina, de las Fuerzas Aéreas, del Ejército; pilotos, ingenieros, y conductores de vehículos	X	X	X
Oficiales de la Marina mercante y marinos		X	X	
Departamento de impuestos de aduanas y consumo			X	X
Aviación civil	Pilotos de aerolíneas, ingenieros, personal técnico y de mantenimiento en aeropuertos, controladores de tráfico aéreo	X	X	X
Red ferroviaria	Conductores de tren, ingenieros, y personal de mantenimiento	x	X	X
Ingenieros y técnicos electrónicos		X	X	#
Técnicos de laboratorio en hospitales y farmacéuticos			X	X
Oficiales de policía		X	X	
Oficiales de bomberos			X	X*
Ocupaciones en las que la reproducción del color debe ser de alta calidad	Industria textil, reproducción de arte, fotografía	X	X	X

*: Excepto deuteranómalos leves.

#: En el documento editado por el IEE, puede leerse: “En electrónica y en la industria de la ingeniería eléctrica se utiliza ampliamente la codificación cromática, con connotaciones de seguridad particularmente importantes... En la industria de las telecomunicaciones se hace un uso extensivo de cableado codificado cromáticamente. Los errores en la identificación podrían tener graves consecuencias”.

- a. Puestos que requieren visión normal del color y una habilidad excelente para la igualación del color.
 - b. Puestos que requieren visión normal del color.
 - c. Puestos en los que una visión del color ligeramente defectuosa no es un problema.
 - d. Puestos en los que una alteración severa de la visión del color no es un problema.
2. Desde el punto de vista de la selección de personal, los pasos a seguir en la evaluación de la visión del color deben ser, en primer lugar, el uso de pruebas de

screening (detección), y en segundo lugar, la *gradación* de la severidad de la alteración. Es importante recordar los siguientes aspectos:

- a. La evaluación debe estar justificada a partir del análisis de los requisitos del puesto y las consecuencias del mal uso del color.
 - b. Debe evitarse la discriminación injustificada. A este respecto es muy importante indicar que los tests de *screening* pueden dejar fuera injustamente a personas con alteraciones muy leves de la visión del color.
 - c. Los defectos tipo tritán son raramente evaluados en tests de detección.
3. En virtud del punto 2.b, algunos autores (Fletcher y Voke, 1985, sección 11.6) recomiendan encarecidamente una evaluación de la visión del color basada en los requisitos del puesto. El análisis de puestos puede ser la herramienta adecuada para conseguir este objetivo.
 4. Nunca debe olvidarse el punto de vista del empleado. El posible rechazo del candidato basado en los resultados de pruebas para la identificación de anomalías en la percepción del color debe ser explicado.

Más allá de recomendaciones, las alteraciones de la visión del color pueden tener implicaciones a nivel de legislación. Por ejemplo, en España, el capítulo 12 del Anexo 1.A del *REAL DECRETO 1971/1999, de 23 de diciembre, de procedimiento para el reconocimiento, declaración y calificación del grado de minusvalía* (B.O.E 26/01/2000), la discromatopsia (definida como “la alteración de la visión de los colores”) computa como un 25% de deficiencia visual si es binocular, y un 15% si es monocular. Aparte de los aspectos mencionados, es muy importante recordar que el uso de los *principios ergonómicos* (Lillo, 2000) puede reducir en algunos casos la probabilidad de problemas asociados a la confusión de colores. Por ejemplo:

1. En lo que respecta a los materiales de uso frecuente en el trabajo, es recomendable realizar una elección de colores que disminuya la probabilidad de confusión en función del tipo de alteración considerado.
2. Uso del principio de redundancia informativa. Cuando sea posible, se recomienda emplear sistemas de codificación usados de manera conjunta, de forma que la discriminación no se base únicamente en una dimensión. Por ejemplo, dentro del uso del color, es muy recomendable que a la hora de

diferenciar dos colores estos no difieran únicamente en cromaticidad, sino que también lo hagan en claridad. Además, el uso de la forma como elemento informativo puede acompañar al uso del color (recuérdese la asociación entre color y forma en los semáforos para peatones).

1.4. CAPÍTULO 4: CATEGORÍAS DE COLOR BÁSICAS

El objetivo del presente capítulo es introducir el concepto de *categorías de color básicas* (nombradas mediante *términos de color básicos*), así como destacar algunas de las investigaciones llevadas a cabo para determinar *cuántas* y *cuáles* son, a la vez que poner de manifiesto el fracaso de algunas hipótesis (que tal vez hoy día se podrían calificar como “ingenuas”) acerca del uso que hacen de dichas categorías las personas con alteraciones cromáticas (nos centraremos en personas daltónicas y observadores envejecidos).

Para ello, la primera parte (apartado 1.4.1) se centra en la *denominación del color* en observadores tricrómatas normales, distinguiendo en función del tipo de estímulos empleados en las investigaciones: *monocromáticos* o *de superficie*. A lo largo de esta sección se deja claro que la denominación del color no sólo ha sido empleada desde la psicología científica como una *técnica* para el estudio de determinados fenómenos de la visión del color, sino que ha trascendido este uso instrumental para pasar a ser un fenómeno de interés *en sí misma*, una vez que los psicólogos fueron influidos por tradiciones de investigación de corte más lingüístico y antropológico, y se interesaron por el estudio de las *categorías cromáticas básicas*. Seguidamente, en la segunda parte del capítulo (apartado 1.4.2), se analizan diversas investigaciones realizadas con observadores con alteraciones en la visión del color, distinguiendo entre daltónicos y observadores envejecidos.

1.4.1. DENOMINACIÓN DEL COLOR EN OBSERVADORES TRICRÓMATAS NORMALES

A pesar de que desde tiempos de Newton la relación entre longitud de onda y tono había sido plenamente aceptada por la comunidad científica, Boynton (1975) se asombraba de que no se hubieran efectuado investigaciones sistemáticas con el objetivo de establecer dicha relación de forma clara y concisa hasta fechas recientes. En dichos trabajos se empleaban tres métodos diferentes para el establecimiento experimental de dicha relación: (1) la *denominación de color*, que trataremos en detalle a continuación,

(2) la *cancelación de tono*, empleada por Jameson y Hurvich (1955) para presentar una versión cuantitativa de la teoría de los procesos oponentes, y (3) el *escalamiento multidimensional*, que permitía reproducir aproximadamente el de sobra conocido círculo cromático, a partir exclusivamente de juicios de similitud entre distintos estímulos.

La *denominación de color*, o “*descripción de un color mediante una expresión verbal*” (Lin, Luo, MacDonald y Tarrant, 2001a, p. 40), como por ejemplo “*rojo*”, “*blanco*” o “*azul oscuro*”, ha sido frecuentemente empleada desde la psicología científica como una técnica para el estudio de la *apariencia del color* (Kaiser y Boynton, 1996, p. 253), ya sea en sí misma, o bien para el estudio de otros fenómenos relacionados con ella, como pueden ser la *inducción cromática* (Uchikawa, Uchikawa, y Boynton, 1989a), el *efecto Bezold Brücke* (Boynton y Gordon, 1965; Bimler y Parami, 2005) o la *constancia del color* (Uchikawa, Uchikawa, y Boynton, 1989b). Desde un punto de vista más aplicado, la denominación del color se ha empleado para el estudio de aspectos ergonómicos, como por ejemplo el *rendimiento cromático* de diferentes fuentes de iluminación (Boynton y Purl, 1989; Boynton, Fargo y Collins, 1990). Pero además, también se ha estudiado la posible influencia de efectos de naturaleza categórica en otros procesos psicológicos como la *memoria del color* (Boynton, Fargo, Olson y Smallman, 1989), o la *búsqueda visual* (Smallman y Boynton, 1990).

Dentro del denominado “*método de denominación del color*” (consúltase Lin et al., 2001a, p. 41), en el que ante la presentación de un estímulo se demanda del observador una respuesta verbal para describirlo, cabe distinguir entre *denominación libre*, en la que no se limita la respuesta del observador, y el experimentador registra la descripción verbal, cualquiera que sea (por ejemplo, “*amarillo*”, “*verde claro*”, “*rosa palo*” o “*blanco sucio*”), y *denominación restringida*, en la que se limita el número de respuestas posibles, de manera que el observador tiene que elegir entre una serie de términos de color que el experimentador le indica al principio del experimento como parte de las instrucciones de la tarea.

Retomando el tema de la *apariencia del color*, existe una larga tradición dentro de los estudios sobre visión del color (enmarcada por lo general en la *teoría de los procesos oponentes*) que ha tratado de establecer cuáles son las *sensaciones elementales*

a partir de cuya combinación se percibe el resto de sensaciones de color, empleando como método experimental la *denominación de color*. Se puede distinguir entre dos grandes clases de investigaciones, en función del tipo de estímulos empleados: (1) *monocromáticos* o (2) *estímulos de superficie*.

1.4.1.1. ESTUDIOS SOBRE DENOMINACIÓN DEL COLOR CON ESTÍMULOS MONOCROMÁTICOS

La Tabla 4.1 recoge algunos de los estudios realizados en la segunda mitad del siglo XX empleando estímulos monocromáticos (como puede consultarse en Boynton y Gordon, 1965, p. 79, y Boynton, 1975, p. 322, estudios previos sólo usaban el método de denominación del color para intentar determinar la localización espectral de los *matices únicos*, interesándose únicamente por tanto en partes concretas y limitadas del espectro visible)¹.

En los estudios pioneros, se pedía a los observadores que emplearan uno o dos nombres para describir el tono percibido ante diferentes estímulos (en caso de emplear dos nombres, el utilizado en primer lugar debía ser el que mejor describía la apariencia del estímulo observado). Por ejemplo, Beare (1963), pidió a sus observadores que emplearan uno de los términos *rojo*, *naranja*, *amarillo*, *verde*, *azul* o *violeta* para describir el estímulo presentado, respuesta que, a deseo del observador, podía ir seguida de un modificador (que ni siquiera tenía por qué ser un nombre de color).

¹ El resumen sobre trabajos científicos que viene a continuación se limita a estudios realizados en condiciones *fotópicas* (véase el capítulo 2), habida cuenta de que estas son las de interés en la presente tesis. Existen trabajos que emplean como técnica la denominación del color en condiciones mesópicas, para estudiar el que se conoce como *intervalo fotocromático*, que va desde el límite de detección de la visión (en el que únicamente funcionan los bastones) al umbral de la visión del color (donde los conos comienzan a ser funcionales) (véase Bouman y Walraven, 1972, sección III; Shevell, 2003, p. 154, para una mención de este tema). En tales condiciones, suceden cosas en principio sorprendentes. Por ejemplo, es posible suscitar la percepción de “*rojo*” con un estímulo monocromático de 500 nm.

Tabla 4.1. Trabajos en los que se ha estudiado la denominación del color de estímulos monocromáticos en observadores tricrómatas normales. En el caso de haber más de un experimento, las columnas de tarea y estímulos se refieren exclusivamente al experimento de denominación de color.

Investigación	Objetivo	Observadores	Tarea	Estímulos
Jameson y Hurvich (1959)	Decidir entre dos alternativas de definición formal de color y explorar la utilidad de los experimentos de <i>escalamiento</i> (de saturación, tono y brillo)	Los dos autores y un observador adicional	<i>Estimación directa</i> de porcentajes de saturación, tono (R, V, Am, Az) y brillo relativo	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 500-590 nm 30mL; 3 mL Tamaño: 2° x 1° ó 2° x 10° Presentación foveal del E test Duración: 1 s Fondo: banda ancha de determinada cromaticidad, 37°
Beare (1963)	Denominación del color en función de la longitud de onda para dos niveles de luminancia	6 H y 4 M entre los 18 y los 27 años	<i>Denominación restringida</i> empleando uno de los términos: R, Na, Am, V, Az o Vio, seguida de una segunda respuesta libre opcional	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 400-722; 414-673 3100mL; 7410 mL (para luz blanca) Iluminancia retiniana igualada* Tamaño: 2° Presentación foveal y maxwelliana Duración: hasta respuesta Fondo: superficie reflectante (6,05 mL, iluminada por una lámpara de tungsteno, 2700 K)
Boynton, Schafer y Neun (1964)	Denominación del color en función de la longitud de onda para tres localizaciones retinianas	2	<i>Denominación restringida</i> empleando 1 ó 2 de los términos: R, Am, V, o Az. <i>Estimación</i> de la saturación mediante una escala <i>ordinal</i>	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 440-660 nm 1000 Td Tamaño: 3° Presentación: foveal y periférica; maxwelliana Duración: 300 ms Modo: apertura/ iluminante
Boynton y Gordon (1965)	Denominación del color en función de la longitud de onda y de la intensidad	3 (H); 12, 20 y 25 años	<i>Denominación restringida</i> empleando 1 ó 2 de los términos: R, Am, V y Az	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 440-660 nm 100 td y 1000 td (para 580 nm) Estímulos igualados en brillo Tamaño: 3° Presentación foveal y maxwelliana Duración: 300 ms Modo: apertura/ iluminante
Wener y Wooten (1979a)	Establecer la relación entre (1) escalamiento de tono, (2) procesos oponentes, y (3) fotopigmentos de los conos	3 (M); algo mayores de 20 años	<i>Estimación directa</i> del porcentaje de los matices permitidos (pudiendo emplear simultáneamente un máximo 2): R, V, Am, Az	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 400-700 nm 2,5 log td (unos 316 td) Tamaño: 1° Presentación foveal y maxwelliana Duración: 1 s Fondo: No Modo: apertura/ iluminante
Wener y Wooten (1979b)	Proponer funciones estándar de (1) la respuesta cromática de los mecanismos oponentes, (2) la denominación del tono en función de la longitud de onda	Datos tomados a partir de los resultados obtenidos con 7 observadores en los trabajos de Jameson y Hurvich (1955), Romeskie (1978), y Wener y Wooten, (1979a)		
Fuld y Alie (1985)	Comprobar la validez de las funciones de denominación del tono propuestas por Wener y Wooten (1979b)	15 (M); entre los 18 y los 26 años	<i>Estimación directa</i> del porcentaje de los matices permitidos: R, V, Am, Az	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 460-640 nm 1 mL (3,2 cd/m²) (para 580 nm) Iluminancia retiniana igualada* Tamaño: 1° Presentación foveal Duración: 2 s Fondo: blanco (3,2°)

*: La iluminancia retiniana se igualó mediante el método indicado de FHF.

Boynton, Schafer y Neun (1964) emplearon una técnica de elección forzada, en la que los observadores podían responder únicamente empleando los términos *rojo*, *amarillo*, *verde*, y *azul*, implicando la ausencia de respuesta *blanco*, y Boynton y Gordon (1965), restringieron el conjunto de términos a *rojo*, *amarillo*, *verde*, *azul*.

Boynton y Gordon (1965), en su famoso artículo sobre el *efecto Bezold-Brücke* (cambio en el tono de estímulos monocromáticos asociado a la manipulación de su intensidad), decidieron incluir el método de denominación del color, entre otras, por las siguientes razones: (1) controlar la posible contaminación de diversas variables que podían haber afectado a los resultados de experimentos clásicos sobre el *efecto B-B* en los que se empleó el método del *ajuste* (por ejemplo Purdy, 1931, citado en Boynton y Gordon, 1965), como son el *tiempo de exposición* (que controlaron presentando flases de 300 ms) o el *contraste simultáneo* (que evitaron mediante una presentación secuencial de los estímulos), y, sobre todo, (2) al contrario que el paradigma psicofísico de *igualación*, la denominación de color sí que permite medir de forma directa el tono experimentado ante una estimulación. En una crítica nada liviana, los autores aseveran que, en su clásico artículo de 1931, Purdy de hecho no midió el tono, por lo que en realidad el título “*Tono espectral en función de la intensidad*” no era el más acertado (Boynton y Gordon, 1965, p. 79). Años después, Boynton escribiría “*Cualquier inferencia acerca del tono que uno pudiera concluir a partir de los datos de Purdy requeriría hacer lo que él no hizo: medir directamente la relación entre la longitud de onda y el tono a un nivel de intensidad dado*” (Boynton, 1975, p. 322).

Los resultados fundamentales de estas investigaciones (en lo relativo a denominación de color de estímulos presentados fovealmente) se pueden resumir de la siguiente manera: (1) la denominación de color, con el control experimental adecuado, y empleando un método de **elección forzada**, arrojaba resultados experimentales válidos y fiables (Boynton, Schafer y Neun, 1964; Boynton y Gordon, 1965), (2) los términos *rojo*, *amarillo*, *verde* y *azul* eran suficientes para describir la apariencia del espectro visible (Boynton y Gordon, 1965), (3) en consonancia con lo esperable a partir de la *teoría de procesos oponentes*, los observadores no emplearon simultáneamente (a pesar de no haber existido la limitación *a priori*) los pares *azul-amarillo* ni *rojo-verde* para describir ninguno de los estímulos, y (4) existió una relación positiva entre el uso de modificadores y el tiempo de respuesta (Beare, 1963).

Para ilustrar los puntos (2) y (3), la Figura 4.1B muestra las funciones teóricas de los denominados *coeficiente de tono* según Hurvich y Jameson (1955), funciones que posteriormente han sido empleadas como predictoras de los resultados obtenidos en experimentos de escalamiento de tono (una variante cuantitativa de la denominación de color que será descrita continuación) de estímulos espectrales (Werner y Wooten, 1979a, 1979b, Fuld y Allie, 1985). El modelo de Hurvich y Jameson (1955, pp 607-608) permite relacionar de forma cuantitativa el tono y la longitud de onda a partir del cómputo de *coeficientes de tono*, $h(r,g)_\lambda$ y $h(y,b)_\lambda$ (Figura 4.1B), que se obtienen a partir de las funciones de valencia cromática, r_λ , g_λ , y_λ , b_λ , (representadas en la Figura 4.1A), mediante las expresiones:

$$h(r,g)_\lambda = \frac{(|r-g|)_\lambda}{(|r-g|+|y-b|)_\lambda} \quad (28)$$

$$h(y,b)_\lambda = \frac{(|y-b|)_\lambda}{(|r-g|+|y-b|)_\lambda}$$

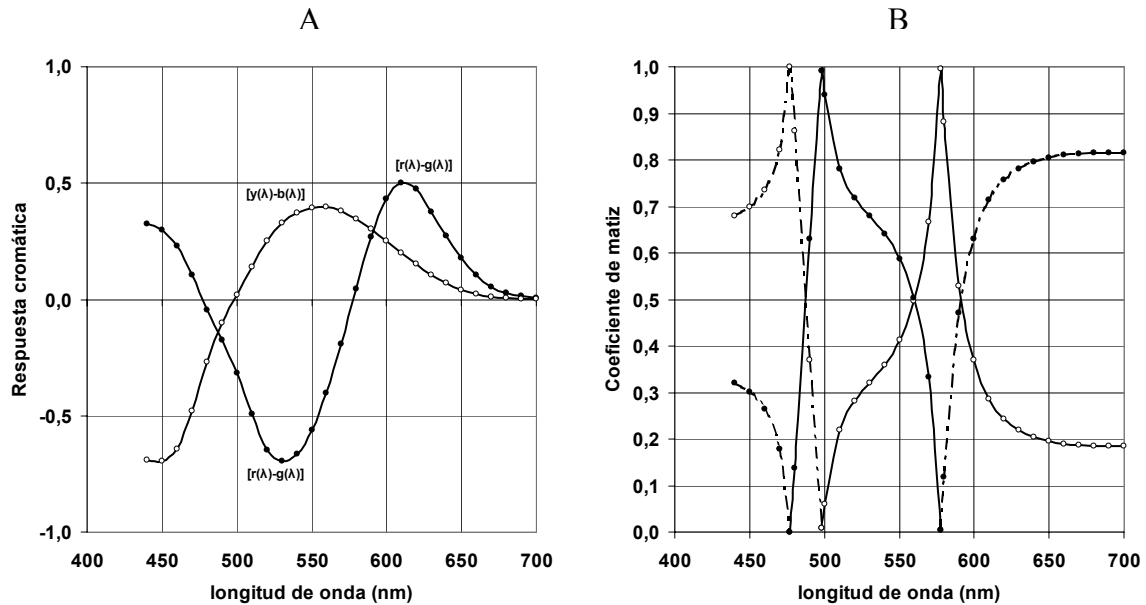


Figura 4.1. Valencia cromática de los mecanismos oponentes y coeficiente de tono en función de la longitud de onda. A: Funciones de valencia cromática de los mecanismos *rojo-verde* ($r-g$, círculos negros) y *amarillo-azul* ($y-b$, círculos blancos), computadas a partir de las *funciones de igualación de color* según la ecuación (29) (también existen ecuaciones que las relacionan directamente con los fundamentales de los conos, véase Jameson y Hurvich, 1968, Werner y Wooten, 1979a, 1979b). B: Funciones de coeficiente de tono, obtenidas a partir de la ecuación (28). Elaborado a partir de Hurvich y Jameson (1955, Figuras 1 y 7).

Para comprobar empíricamente la relación propuesta según el modelo de Hurvich y Jameson (1955) entre los mecanismos cromáticos (determinados experimentalmente mediante el método psicofísico de cancelación) y la denominación de tono (que permite obtener información directa sobre atributos psicológicos de la apariencia del color), Werner y Wooten (1979a) recurrieron a la comparación, para cada uno de los observadores que tomaron parte en su experimento, entre (a) los *coeficientes de tono* determinados según las ecuaciones del modelo de Hurvich y Jameson (1955) a partir de las funciones de cancelación obtenidas experimentalmente (ecuación (28)) y (b) los datos provenientes directamente de un experimento de *escalamiento de tono*.

Los autores concluyeron (Werner y Wooten, 1979a; Werner, 1998) que las funciones de cancelación predecían con bastante exactitud el escalamiento directo de tono (el valor medio de las diferencias en valor absoluto fue del 11,2%, debiéndose las desviaciones más sistemáticas a que el porcentaje de *amarillo* estaba sobreestimado para las longitudes de onda más largas). Lo mismo ocurrió si empleaban como predictoras las *funciones estándar de respuesta cromática oponente*, $(y-b)_\lambda$ y $(r-g)_\lambda$, propuestas por Judd (1951, citado en Hurvich y Jameson, 1955), que se computan a partir de las *funciones de igualación de color* (véase el capítulo 2), según las expresiones

$$\begin{aligned}(y-b)_\lambda &= 0,4\bar{y}(\lambda) - 0,4\bar{z}(\lambda) \\ (r-g)_\lambda &= 1,0\bar{x} - 1,0\bar{y}\end{aligned}\tag{29}$$

y que están representadas en la Figura 4.1A (en este caso, el valor medio de las diferencias en valor absoluto fue del 11,1%). Werner y Wooten (1979b) también propusieron unas *funciones estándar de respuesta cromática oponente* (véase la Tabla 4.1), de las que a su vez derivaron, nuevamente según la ecuación (28), una *función estándar de denominación de tono*. Fuld y Allie (1985) llevaron a cabo un estudio para comprobar la validez de dicha función de cara a predecir los resultados obtenidos en un experimento de escalamiento de tono, llegando a unas conclusiones similares a las de Werner y Wooten (1979a).

Dentro del estudio de la denominación del color, el trabajo de Sternheim y Boynton (1966) supuso un punto de inflexión, por los dos motivos siguientes: (1) introducía un método cuantitativo para evaluar la apariencia del color, denominado *escalamiento de tono (hue scaling)* (basado en Jameson y Hurvich, 1959, véase la Tabla 4.1), y además (2) proponía y empleaba unos criterios para determinar si un tono determinado era o no *elemental*. En cuanto al *escalamiento de tono*, la esencia del método es que, a partir de un conjunto restringido de términos dado por el experimentador (de modo análogo a la denominación restringida), el observador tiene que asignar *proporciones relativas* (o porcentajes) de dichos términos según la magnitud con las que los matices correspondientes sean percibidos ante la presentación de un estímulo (por ejemplo, un estímulo percibido como verde-azulado puede describirse como 75% *verde*, 25% *azul*). Esto permite pasar de las escalas nominales (propias de la denominación de color si se emplea un solo término) u ordinales (si se permite emplear más de un término cuyo orden se corresponde con la primacía de las sensaciones suscitadas por el estímulo) a las cuantitativas (Gordon, Abramov y Chan, 1994, han mostrado que este método presenta buenas cualidades psicométricas).

En lo que respecta al establecimiento de criterios para determinar si un tono es *elemental* (irreducible a otros matices), Sternheim y Boynton (1966) propusieron que debía cumplir con dos criterios: ser *suficiente* (el tono se emplea cuando su uso está permitido) y *necesario* (si se prohíbe su uso, no es posible describir completamente la apariencia del estímulo presentado). El significado de estos criterios se entiende mejor si previamente se explica la estrategia experimental que llevaron a cabo, como haremos a continuación.

Para determinar si *naranja* era o no un tono elemental, Sternheim y Boynton (1966) partieron de un conjunto limitado de *cuatro* categorías: *verde*, *amarillo*, *naranja*, y *rojo*. El observador debía describir la apariencia de los estímulos presentados (mediante el método de escalamiento de tono descrito anteriormente²) empleando únicamente un conjunto de *tres* categorías (de las cuatro mencionadas), que le eran indicadas por el experimentador en cada sesión. Un conjunto de matices era *suficiente* si permitía describir completamente la apariencia del estímulo presentado (la suma de las

² En la literatura especializada se suele emplear el término *técnica de denominación del color mediante juicios continuos (continuous judgemental color-naming technique)* para referirse a esta técnica.

proporciones indicadas para los distintos matices era 1). Para que un tono x fuese *necesario*, debía ser imposible describir completamente la apariencia del estímulo presentado una vez eliminado dicho tono del conjunto de términos permitidos³. Por ejemplo, a partir de los términos *verde*, *naranja* y *rojo*, puede describirse un estímulo de 600 nm como constituido por 0,76 de naranja y 0,03 de rojo. Esto indica que la terna de matices indicada no es suficiente para describir el estímulo ($0,76 + 0,03 < 1$). Sin embargo, a partir de los términos *verde*, *amarillo* y *rojo*, el mismo estímulo puede describirse completamente como constituido por 0,77 de rojo y 0,23 de amarillo ($0,77 + 0,23 = 1$). Este resultado indica que amarillo y rojo son *suficientes* para describir el estímulo, y junto con el resultado anterior, que amarillo es *necesario* para describirlo. Siguiendo estos criterios, concluyeron que *naranja* no era un tono elemental, puesto que puede sustituirse por las proporciones adecuadas de *rojo* y *amarillo* (como en el ejemplo descrito).

Durante la década de los ochenta se realizó una serie de investigaciones encaminadas a establecer experimentalmente cuáles eran los matices y las categorías acromáticas elementales para describir la apariencia de estímulos tanto cromáticos como acromáticos, expandiendo por ello de forma necesaria el rango de estímulos empleados fuera de los espectrales, lo que posibilitaba el estudio de zonas del espacio de color diferentes de las ya investigadas anteriormente.

Las conclusiones de estos trabajos, tomadas conjuntamente, fueron que los matices elementales eran *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul*, siendo las categorías acromáticas elementales *blanco* y *negro*, una vez aportadas pruebas a favor de la naturaleza derivada de otras categorías cromáticas como *naranja* (analizable en términos de amarillo y rojo, véase el estudio ya comentado de Sternheim y Boynton, 1966), *morado* y *violeta* (analizables en términos de rojo y azul, Fuld, Wooteny y Whalen, 1981), *rosa* (analizable en términos de rojo y blanco, Ludman, 1983, citado en Wooten y Miller, 1997), o *marrón* (analizable en términos de amarillo y negro, Quinn, Rosano, Wooten, 1988) y de la categoría acromática *gris* (analizable en términos de blanco y negro, Quinn, Wooten, Ludman, 1985).

³ Precisamente a partir de esta incompletud se determinan las denominadas “*funciones computadas de los matices ausentes*”, que deben ser similares a las “*funciones de respuesta*” de los matices correspondientes cuando estos están disponibles.

Sin embargo, las investigaciones que tratan de establecer el supuesto carácter elemental de determinadas categorías de color no está exenta de críticas, puesto que es sabido que la denominación de color puede estar influida por factores como la experiencia de los observadores o el conjunto concreto de términos que se emplean para describir la apariencia de la estimulación (Beare, 1963; Beare y Siegel, 1967, Wooten y Miller, 1997), así como del orden concreto de presentación de las diferentes combinaciones de los elementos del conjunto formado por los términos estudiados. Pero, mucho más importantes si cabe, son las dudas que surgen a partir de la más pura fenomenología (y no debe olvidarse que el punto de partida de la teoría de los procesos oponentes fue precisamente la observación fenomenológica): por ejemplo, ¿es realmente *naranja* reductible a las sensaciones de amarillo y rojo (Boynton, 1975), o *gris* a las de blanco y negro? Tal vez la existencia del debate planteado en torno a la naturaleza del *marrón* sea la que mejor ilustra esta polémica (en contra de Quinn, Rosano, y Wooten, 1988, véase Fuld, Werner y Wooten, 1983, trabajos en los que se aportan pruebas a favor de la posible naturaleza de marrón como una categoría elemental).

Al contrario que los estudios pioneros que pretendían establecer la relación entre tono y longitud de onda, comentados al comienzo de esta sección, el estudio de las denominadas *categorías básicas de color* (CCB), que pasamos a comentar en la sección siguiente, se ha llevado a cabo eminentemente empleando colores de superficie (estímulos que reflejan luz).

1.4.1.2. ESTUDIOS SOBRE DENOMINACIÓN DEL COLOR CON ESTÍMULOS DE SUPERFICIE: CCB

Acabamos de describir el uso que se hizo de la denominación de color, como técnica para el estudio de la apariencia del mismo, por parte de la psicología científica durante la segunda mitad del siglo XX. De manera bastante independiente, a lo largo de buena parte del mismo siglo, diferentes *estudios de campo*, realizados eminentemente por *antropólogos* (Kay, 1997), también emplearon como técnica la denominación del color, pero desde una óptica totalmente diferente, a saber, enmarcados en el más amplio debate “*universalismo* vs. *relativismo*”. El objetivo de estos estudios no era el estudio de la apariencia del color en sí misma, sino intentar revelar, haciendo patentes las diferencias culturales existentes en la denominación del color, la supuesta influencia del lenguaje sobre la percepción del color (como ejemplo que aportaba una fuerte evidencia a favor de la *hipótesis relativista de Sapir-Whorf*⁴).

En un célebre ensayo, los antropólogos Berlin y Kay (1969) hicieron que la postura universalista recobrara la fuerza que había perdido en las décadas previas, al recoger datos que apoyaban las dos hipótesis básicas de su investigación acerca de los diferentes sistemas de categorización del color: 1) la existencia de un inventario universal y restringido de *términos básicos de color* (TBC), y 2) la existencia de una *secuencia evolutiva* que restringe la manera en la que se van incorporando nuevos términos de color dentro del vocabulario de una lengua. Para ser considerado como un TBC (esto es, como una etiqueta verbal para una CCB), un término debe cumplir una serie de requisitos⁵ (Berlin y Kay, 1969; Kay, 1975; Kay y McDaniel, 1978; Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 11; Hardin y Maffi, 1997; Lin et al., 2001a, p. 48; nótese que a excepción del último todos son de tipo lingüístico):

⁴ Esta hipótesis (que tiene una versión más fuerte y otra más débil) es esencial en las tesis que defienden el *relativismo* cultural y lingüístico, defendiendo que el lenguaje influye y determina la percepción. Tal vez el mejor ejemplo de su aplicación al dominio del color resida en la siguiente cita: “*Hay una gradación continua del color de un extremo del espectro al otro. Aún así, un americano que lo describa empleará los matices rojo, naranja, amarillo, verde, azul, morado – o algo parecido. No existe nada inherente ni en el espectro ni en la percepción humana del mismo que pueda obligar a realizar la división de esta manera*” (Gleason, 1961, citado en Kay y McDaniel, 1978, p. 610).

⁵ Véase Maffi y Hardin (1997) para tomar conciencia acerca del intenso debate en torno a la validez de diferentes criterios sobre la basicidad de un término de color.

1. Debe ser *monolexémico* (por ejemplo, *verde-azulado* no cumpliría esta propiedad).
2. Su significado *no debe estar incluido* en otro término de color (por ejemplo, *bermellón* es un tipo de rojo y por lo tanto no cumple esta propiedad).
3. Su uso *no debe estar restringido* a una única clase de objetos (como por ejemplo ocurre con *rubio*): debe emplearse de forma general/abstracta.
4. Debe tener *saliencia psicológica* (evidenciada en su facilidad de elicitación y en su frecuencia de uso). Crawford (1982, véase Boynton y Olson, 1990, Maffi y Hardin, 1997), cuyo trabajo es citado habitualmente para remitir a una definición de BCT, introdujo la siguiente puntualización (con el objetivo de permitir una definición más operativa) sobre la saliencia psicológica de un TBC: Debe ser empleado de forma *consensuada* (por diferentes hablantes de un idioma), y *consistente* (por el mismo hablante ante el mismo estímulo en diferentes ocasiones).

Con el objetivo de contrastar las dos hipótesis básicas mencionadas, Berlin y Kay (1969) realizaron una doble investigación que abarcó un total de 98 lenguas del mundo. Por un lado llevaron a cabo una revisión bibliográfica de 78 lenguas, y por otra parte, otras 20 fueron objeto de un estudio de campo. En lo que concierne al estudio de campo (en realidad un estudio de tipo comparativo), emplearon como material estimular un conjunto de 329 muestras de color tomadas del atlas Munsell⁶, de las cuales 320 eran cromáticas, siendo las 9 restantes acromáticas (de reflectancia neutral). Las muestras cromáticas muestreaban la superficie del cono de color, siendo por tanto las muestras del atlas con la máxima saturación posible para los diferentes matices y niveles de claridad. La tarea de los observadores consistió en enumerar las categorías cromáticas básicas de su idioma en primer lugar, y localizar a continuación, entre las muestras presentadas, a) los *mejores ejemplares* de cada una de las categorías, así como b) *todas las muestras* que podían ser denominadas mediante dichas categorías. Los objetivos de esta doble tarea eran a) localizar los denominados colores focales (*foci* de aquí en adelante), y b) determinar la extensión de cada una de las CCB en el espacio de color.

Los resultados fundamentales de esta investigación vinieron a apoyar las tesis de partida, de carácter universalista, al demostrar que la categorización del color *no* era

⁶ El Sistema de Color Munsell es un sistema perceptivamente uniforme de ordenación y especificación del color en torno a tres dimensiones: *Value* (claridad), *Hue* (matiz) y *Chroma* (croma) (Wyszecki y Stiles, 1982, sección 6.6.1; Pujol, 2002).

aleatoria, y que los *foci* de los TBC eran similares en todos los lenguajes. Además, el vocabulario de TBC de una determinada lengua 1) o bien estaba formado por once términos que se correspondían con las CCB: *blanco, negro, rojo, verde, amarillo, azul, marrón, rosa, naranja, morado* y *gris*, o bien por un subconjunto de tales términos⁷, y 2) en caso de que el vocabulario de TBC estuviera formado por un subconjunto, existían serias restricciones respecto a qué términos concretos formaban parte del mismo. Fue precisamente la distribución empírica del *tipo de CCB en función del número de las mismas* lo que sentó la base para que los autores presentaran una supuesta secuencia evolutiva a través de la cual una lengua va *codificando nuevos foci* en su vocabulario de TBC (véase la Tabla 4.2). A modo de ejemplo, si una lengua posee únicamente dos CCB, estas serán *blanco* y *negro*, y si posee tres, serán *blanco, negro* y *rojo*.

Sin embargo, a la luz de nuevos datos (eminentemente los aportados por Rosch Heider, 1972a, 1972b, véase por ejemplo Berlin y Berlin, 1975; Kay, 1975), Kay y McDaniel (1978) presentaron una importante reformulación de la teoría, según la cual las CCB:

1. Se dividen en *primarias* (las famosas seis categorías elementales propuestas por Hering: *blanco, negro, rojo, verde, amarillo, azul*, que como vimos en el apartado anterior serían confirmadas como las sensaciones elementales por diferentes estudios experimentales realizados en la década de los 80), *compuestas* (resultado de la unión de dos o más categorías primarias, por ejemplo, *grue*, que incluye las categorías de *verde* y *azul*), y *derivadas* (aquellas categorías formadas a partir de la intersección de algún par de categorías primarias: *marrón, rosa, naranja* y *morado*).
2. Pasan a interpretarse como conjuntos borrosos (Zadeh, 1965).
3. Son consecuencia de las bases neurofisiológicas del procesamiento del color (De Valois, Abramov y Jacobs, 1966; Ratliff, 1976), y por último
4. Se van adquiriendo mediante un proceso evolutivo de *sucesiva partición del espacio de color*, diferente al proceso de *sucesiva codificación de foci* (Berlin y Kay, 1969).

⁷ Todos las lenguas poseían en su vocabulario un inventario de TCB cuyo número oscilaba entre un mínimo de 2 y un máximo de 11 (ó tal vez 12 para determinadas lenguas, como posteriormente ha sido confirmado para el ruso o el turco, que poseen 12 CCB, al dividir el *azul* en dos categorías diferentes, consúltese por ejemplo Davies y Corbett, 1994).

La Tabla 4.2 sirve de guía comparativa entre ambos modelos teóricos: Berlin y Kay, 1969 vs. Kay y McDaniel, 1978). Estudios posteriores, encuadrados en el conocido como *World Color Survey* (WCS; Investigación de los Colores del Mundo), y que pretendían ser más exhaustivos y mejorar algunas limitaciones metodológicas del estudio de Berlin y Kay (1969, véanse las Tablas 4.3 y 4.4), sirvieron como la base de datos fundamental a partir de la cual ir realizando posteriores comprobaciones de la teoría así como sucesivos ajustes para refinar la parte evolutiva de la misma (el lector interesado puede consultar Kay, Berlin y Merrifield, 1991; Kay, Berlin, Maffi y Merrifield, 1997; y Kay y Maffi, 1999, publicaciones que se encuentran citadas en las Tablas 4.5 y 4.6, donde se resumen sus aspectos fundamentales).

Tabla 4.2. Características esenciales de los modelos teóricos, previos al WCS, sobre la naturaleza y la línea evolutiva de los sistemas de categorización del color.

Trabajo	Características de la teoría evolutiva propuesta							
Berlin y Kay (1969)	Proceso evolutivo	Progresiva codificación de <i>foci</i>						
	Tipos de CCB	Todas ellas <i>implícitamente</i> formalizadas mediante la teoría clásica de conjuntos						
	Secuencia evolutiva	$\begin{bmatrix} B \\ N \end{bmatrix}$	$[R]$	IIIa $[V]$	IVa $[Am]$	$[Az]$	$[Mar]$	$\begin{bmatrix} Mor \\ Ros \\ Nar \\ Gr \end{bmatrix}$
				IIIb $[Am]$	IVb $[V]$			
		I	II	III	IV	V	VI	VII
Problemas y lagunas	<ul style="list-style-type: none">• Ni el etiquetado ni la conceptualización de las CCB son correctos: Una misma CCB puede significar cosas diferentes en diferentes etapas; y una misma CCB puede tener varios foci (distribución multimodal) para distintos hablantes de una lengua• Estos problema se resuelven mediante la reconceptualización de Kay y McDaniel (1978), al distinguir entre CCB compuestas, primarias y derivadas							
Kay y McDaniel (1978)	Proceso evolutivo	Progresiva <i>partición</i> del espacio de color. Este aspecto se mantiene en modelos posteriores						
	Tipos de CCB	Compuestas, Primarias y Derivadas (todas ellas formalizadas mediante la teoría de conjuntos borrosos). Este aspecto también se mantiene en los modelos posteriores						
	Principios específicos	Las CCB compuestas, propias de las etapas evolutivas más tempranas, son el resultado de la <i>unión difusa</i> de dos o más categorías primarias. Sucesivas particiones del espacio de color concluyen con la aparición de las 6 categorías primarias en el estadio V. Finalmente, aparecen las categorías derivadas, a partir de la <i>intersección difusa</i> de varias categorías primarias.						
	Secuencia evolutiva	$\begin{bmatrix} B / R / Am \\ N / V / AZ \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ N / V / AZ \end{bmatrix}$	IIIa $\begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V \\ Az \\ N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V \\ Az \\ N \\ Mar \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V \\ Az \\ N \\ Mar \\ Ros \\ Mor \\ Nar \\ Gr \end{bmatrix}$
				IIIb $\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$				
	I	II	III	IV	V	VI	VII	
Problemas y lagunas	<ul style="list-style-type: none">• Las CCB primarias son erróneamente* denominadas <i>respuestas neuronales fundamentales</i> (este error se mantendrá aún en Kay, Berlin, y Merrifield, 1991)• Sólo contempla la existencia de 4 CCB compuestas. La existencia de la CCB compuesta V/Am es un problema esencial para el modelo• La CCB <i>gris</i> puede aparecer ya desde el estadio IIIa• No explica por qué el número de CCB compuestas encontradas empíricamente es sólo una pequeña parte del número total de combinaciones de CCB primarias lógicamente posible ($2^6 - 1 - 6 = 57$)• Este último problema se intenta resolver mediante el principio específico propuesto por Kay, Berlin, y Merrifield (1991)							

Tabla 4.3. Tareas más empleadas para identificar y localizar las CCB de una lengua. Elaborado a partir de Davies y Corbett (1994, 1997). Est. crom = estimulación cromática.

Tipo de medida	Tarea		Breve descripción	Variables dependientes
Conductual	En ausencia de est. crom.	Listas elicítadas	Se pide al observador que escriba/verbalice todos los nombres de color que sepa	<ul style="list-style-type: none"> • Frec. de aparición • Orden de aparición
	En presencia de est. crom.	Búsqueda de los <i>foci</i> o de todos los ejemplares de las CC	Se pide al observador que localice los <i>foci</i> o todos los ejemplares de las CC entre varios estímulos presentados simultáneamente	<ul style="list-style-type: none"> • Consenso • Consistencia • TR • Localización en un espacio de color
		Denominación de color	Se pide al observador que describa verbalmente la apariencia de un estímulo de color presentado aisladamente	
Lingüística	Frecuencia de uso en textos		Se realiza un recuento de nombres de color	• Frecuencia de uso
	Análisis morfológico		Se realiza un análisis de los nombres de color	<ul style="list-style-type: none"> • Longitud de palabras • N° formas derivadas

Tabla 4.4. Comparación entre los métodos empleados en Berlin y Kay (1969) y el WCS.

Aspecto metodológico		Berlin y Kay (1969)	WCS (1976...)
Estímulos	Número	329	330
	Descripción	<ul style="list-style-type: none"> • 320 cromáticos (superficie del cono de color) • 9 Acromáticos 	<ul style="list-style-type: none"> • 320 cromáticos (superficie del cono de color) • 9 Acromáticos
Participantes	N° de idiomas	20 idiomas (78 revisión bibliográfica)	110 idiomas
	Lugar donde se realizó el estudio de campo	Berkley (inmigrantes)	In situ (autóctonos)
	Conocimiento de otros idiomas	Mayormente bilingües	Mayormente monolingües
	N° de participantes por idioma	3 ó menos	25 en casi todos los casos
Tareas empleadas para localizar las CCB	Mejores ejemplares (<i>foci</i>)	Búsqueda del mejor ejemplar de cada CCB	
	Extensión	Búsqueda de todos los ejemplares de cada CCB	Denominación de color

Como ha quedado implícitamente señalado en la exposición realizada hasta ahora sobre la investigación de las CCB, a pesar de que en un principio (y salvo notables excepciones), las líneas de investigación lideradas por psicólogos y por antropólogos durante la segunda mitad del siglo XX eran *tan paralelas* (ambas apuntaban hacia conclusiones de carácter universalista) *como ajenas*, ambas acabaron confluyendo. Como ejemplo inequívoco, basta con acudir a Kay y McDaniel (1978), que relacionaron de forma *explícita* los *coeficientes de tono* (computados, según la ecuación (28), a partir de las funciones psicofísicas de cancelación de tono que expresan la valencia cromática de los mecanismos oponentes *rojo-verde* y *amarillo-azul*) con las CCB primarias asociadas con estímulos monocromáticos, *exactamente de la misma manera* que harían posteriormente Werner y Wooten (1979a, 1979b), tal y como se describió en el apartado anterior. (Otra prueba de esta confluencia es la reciprocidad en las citas empleadas reiteradamente por Paul Kay y sus colaboradores, de un lado, y por expertos en visión del color, como Robert M. Boynton y sus colegas, por otro).

Tabla 4.5. Características esenciales del modelo teórico sobre la naturaleza y la línea evolutiva de los sistemas de categorización del color propuesto por Kay, Berlin y Merrifield (1991).

Kay, Berlin, y Merrifield (1991)	Problema que intenta resolver este modelo	● Intenta explicar por qué existen (sólo) ciertas CCB compuestas y no otras, recurriendo a los conocimientos sobre visión del color						
	Principios específicos	Regla (empírica) de la CCB compuesta						
	Secuencia evolutiva	$\begin{bmatrix} B / R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B / R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	IIIa $\begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$	IVa $\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ Az \\ V \\ N \end{bmatrix}$		
				IIIb $\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$				
		$\begin{bmatrix} B / R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	Sistemas de categorización no publicados previamente	IIIc $\begin{bmatrix} B / Am \\ R \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$	IVb $\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V \\ Az / N \end{bmatrix}$			
			Sistemas con CCB compuestas que incluyen Am/V	IIId $\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V / Az \\ N \end{bmatrix}$	IVc $\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V \\ Az \\ N \end{bmatrix}$			
		Problemas y lagunas	● La constatación empírica de la existencia de las CCB compuestas <i>V/Am</i> y <i>Am/V/Az</i> se revela como el problema esencial para el modelo, puesto que la secuencia evolutiva que lleva a su aparición no está clara (puesto que ya desde el estadio I <i>V</i> y <i>Am</i> pertenecen a CCB compuestas distintas)					
			● No se explica la existencia de la CCB compuesta <i>Az/N</i> partir de los conocimientos de visión del color					
	● La CCB <i>gris</i> puede aparecer ya desde el estadio IIIa, y las CCB <i>marrón</i> , <i>morado</i> o <i>ambas</i> puede aparecer antes de que se disuelva la CCB verde/azul: estas CCB derivadas <i>no</i> presentan una línea evolutiva clara							

Efectivamente, como puede constataarse en Boynton (1997), a raíz del trabajo de Berlin y Kay (1969), la psicología experimental se interesó doblemente por el estudio de las CCB: por una parte, *retomó* con fuerza el objetivo de determinar cuáles eran las *sensaciones elementales* de las que se derivaban las CCB primarias, para lo cual empleó la denominación del color como técnica para el estudio de la apariencia del color (de la manera descrita en el apartado anterior), pero además, por otra parte, *generó* un interés genuino por la denominación del color en sí misma, en un afán de identificar las CCB y confirmar sus propiedades mediante los procedimientos propios de la psicología experimental y empleando estímulos de superficie.

Tabla 4.6. Características esenciales de los modelos teóricos, afinados a partir de los resultados del WCS, sobre la naturaleza y la línea evolutiva de los sistemas de categorización del color.

Kay, Berlin, Maffi y Merrifield (1997)	Problemas que intenta resolver este modelo	<ul style="list-style-type: none"> • Intenta explicar la aparentemente línea evolutiva confusa de algunas CCB derivadas (concretamente, la temprana aparición de <i>gris</i>, o incluso <i>marrón</i> y <i>morado</i>) • Intenta explicar la existencia de la CCB compuesta <i>Az/N</i> partir de los conocimientos de visión del color 				
	Principios específicos	Postula la existencia de dos procesos (parcialmente) independientes 1) Progresiva división de las categorías compuestas en las 6 fundamentales. Esto da lugar a V estadios. Se distingue a su vez entre otros dos procesos parcialmente independientes: Progresiva diferenciación los canales i) <i>blanco/cálido</i> y ii) <i>negro/frío</i> 2) Combinación de las categorías fundamentales en categorías derivadas				
	Secuencia evolutiva [IIIc eliminada]	$\begin{bmatrix} B / R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	$III_{V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$ $III_{N/Az} \begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ V \\ N / Az \end{bmatrix}$ $III_{N/V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	$IV_{V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$
				$III_{Am/V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V / Az \\ N \end{bmatrix}$	$IV_{N/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V \\ N / Az \end{bmatrix}$	
				$III_{Am/V} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V \\ N / Az \end{bmatrix}$	$IV_{Am/V} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V \\ Az \\ N \end{bmatrix}$	
		I	II	III	IV	V
	Problemas y lagunas	<ul style="list-style-type: none"> • La constatación empírica de la existencia de las CCB compuestas <i>V/Am</i> y <i>Am/V/Az</i> sigue siendo un problema esencial para el modelo • Justamente este “<i>misterio</i>” es el que intenta explicar el nuevo modelo propuesto por Kay y Maffi (1999) 				
Kay y Maffi (1999)	Problema que intenta resolver este modelo	<ul style="list-style-type: none"> • La línea evolutiva de las CCB compuestas <i>V/Am</i> y <i>Am/V/Az</i> 				
	Principios propuestos	Postula la existencia de dos líneas evolutivas: 1) En la línea mayoritaria, la evolución procede a través de los cuatro siguientes principios (el primero de los cuales es lingüístico, siendo el resto relativos ala apariencia del color): (0) Partición; (1) Blanco y Negro; (2) Templado y frío; (3) Rojo 2) En la línea minoritaria, se cumple la Hipótesis de la Emergencia, de manera que los principios (1) y (2) anteceden al (0)				
	Secuencia evolutiva [III _{Am/V} III _{N/Az} eliminadas]	$\begin{bmatrix} B / R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$	$III_{N/V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ N / V / Az \end{bmatrix}$ $III_{V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R / Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$ $III_{Am/V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V / Az \\ N \end{bmatrix}$	$IV_{N/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V \\ N / Az \end{bmatrix}$ $IV_{V/Az} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$ $IV_{Am/V} \begin{bmatrix} B \\ R \\ Am / V \\ Az \\ N \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} B \\ R \\ Am \\ V / Az \\ N \end{bmatrix}$
		I	II	III	IV	V
	Problemas y lagunas	<ul style="list-style-type: none"> • El sistema de categorización IIIc de (Kay y McDaniel, 1978) no se ajusta estrictamente al modelo (pero se trata de un problema menor: 1 sola lengua de las 110 del WCS presenta este sistema) 				

A lo largo del resto de esta sección se describirán algunas investigaciones de obligada referencia cuando se expone el estudio de las CCB por parte de la psicología científica. Con el objetivo de hacer más clara la presentación de los resultados experimentales, tal y como se ha realizado en secciones anteriores, la Tabla 4.7 resume una serie de características relevantes de las diferentes investigaciones que se citan a continuación (como por ejemplo el número de observadores o el criterio operacional de consenso empleados en cada investigación).

Las investigaciones llevadas a cabo en la Universidad de California (San Diego) por el equipo de R. M. Boynton en la segunda mitad de la década de los 80 (consúltese Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 11, para un resumen) se llevaron a cabo con el objetivo de establecer cuántas y cuáles eran las CCB del inglés, con la rigurosidad propia del método experimental. A continuación se describen los estudios realizados por Boynton y Olson (1987, 1990). En condiciones de observación controladas (presentación aislada de cada muestra de color durante un periodo máximo de exposición de 5 segundos, sobre un fondo acromático de claridad media y evitando la presencia de reflejos), cada observador tuvo que denominar el color presentado mediante el uso de una única palabra (denominación monolexémica) en dos ocasiones distintas (como veremos, estas son las características esenciales, a grandes rasgos, del método empleado desde la psicología científica para el establecimiento de las CCB). Los estímulos empleados fueron 424 muestras del atlas OSA (*Optical Society of America*)⁸.

El experimentador no introducía nombres de color en ningún momento (la denominación era pues libre pero monolexémica), pero los análisis de datos partieron de la distinción (*a priori*, y según los resultados de Berlin y Kay, 1969) entre CCB y *categorías cromáticas no básicas* (CCNB), siendo las primeras: *black* (negro), *white* (blanco), *red* (rojo), *green* (verde), *amarillo* (yellow), *azul* (blue), *brown* (marrón), *pink* (rosa), *orange* (naranja), *purple* (morado), y *gray* (gris).

⁸ El Sistema de Color OSA es un sistema perceptivamente uniforme de ordenación y especificación del color (cada muestra del cual se encuentra rodeada de otras 12 muestras vecinas localizadas a una distancia equivalente medida en términos de pasos discriminables) en torno a tres dimensiones: *L* (claridad), *j* (un eje similar al *amarillo-azul*) y *g* (un eje similar al *verde-rojo*) (Wyszecki y Stiles, 1982, sección 6.6.4; Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 11).

Respecto a la comparación entre el uso de CCB y CCNB con respecto a cada una de las tres variables dependientes medidas en ambos experimentos, los resultados fundamentales fueron los siguientes (el artículo de 1990 es mucho más sistemático y conciso a la hora de expresar los resultados referentes a estas variables):

1. *Consenso*. Las CCB se emplearon de forma más *consensuada* que las CCNB. En el estudio de 1987, donde el consenso se definió como un 100% de respuestas iguales, las 128 muestras que cumplieron este criterio (un 30% de las 424), recibieron siempre como respuesta el nombre de una CCB. Únicamente *negro* no se empleó de forma consensuada (debido a la mala representación de las categorías acromáticas en el atlas OSA, como se comentará en breve). Sin embargo, en el estudio de 1990, sólo 9 muestras (un 2% de las 424) fueron denominadas con un consenso absoluto (100%), siéndolo 244 (un 58%) si se rebajaba el criterio de consenso a $> 50\%$ (sin duda, la experiencia de los observadores, como puede consultarse en la Tabla 4.7 influyó en este resultado tan diferente). De cualquier forma, para ciertos niveles de consenso (17-16 respuestas de 18), todas las CCB se emplearon, *sin solapamiento*, de forma más consensuada que las CCNB (el máximo consenso alcanzado por una CCNB, *melocotón*, fue de 15 respuestas sobre 18).
2. *Consistencia*. Todas las CCB se emplearon de forma más *consistente* que las CCNB. Aunque esta información no se hizo explícita de forma pormenorizada en el artículo de 1987, en el de 1990 se mostró que todas las CCB, *sin solapamiento*, obtuvieron puntuaciones más altas que las CCNB en la ratio (nº de muestras denominadas consistentemente / nº de muestras denominadas inconsistentemente).
3. *Tiempo de reacción*. El TR de todas las CCB fue menor que el de las CCNB. En el artículo de 1987 se mostró cómo el TR medio de las CCB fue menor al de las CCNB. En el de 1990, como en las dos medidas anteriores, se mostró nuevamente que *no había solapamiento* entre las distribuciones de TR de ambos tipos de categorías. Además, se mostró una clara tendencia del TR a aumentar a medida que disminuía el consenso: de hecho, los autores identificaron los *foci* de las CCB precisamente como aquellas muestras denominadas con consenso y con el mínimo TR.

Tabla 4.7. Algunas investigaciones realizadas desde la psicología experimental para el establecimiento de las CCB del inglés y del chino.

Investigación [e idioma estudiado]	Estímulos: N (y atlas)	Tarea (y VVDD experimentales)	Observadores [nº total de Observaciones]	Condiciones de observación	Algunas características del Análisis
Boynton y Olson (1987) [Inglés]	424 (OSA)	Denominación monolexémica	7 x 2 (EEUU) ¿Edad? ¿Sexo? Los 2 autores, 3 colegas, y 2 estuds. [424 x 7 x 2 = 5936]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: 3200K • Fondo: acr. ($\rho = 0,2$; $L_v = 40 \text{ cd/m}^2$, $E_v = 630 \text{ lx}$) • Tamaño: 3,8 cm², a 65 cm; unos 3,35° • Presentación secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 5 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrado sólo en las CCB • Descriptivo • Localiz.: espacio L, j, g. • Consenso (100%) • Colores focales (TR) • Centroides • Conexiones
Boynton y Olson (1990) [Inglés]		(denominación y TR)	9 x 2 (EEUU) Edad en torno a 20 años; ¿Sexo? Todos estuds. (2 del estudio anterior) [424 x 9 x 2 = 7632]		<ul style="list-style-type: none"> • Centrado en las CCB cromáticas y las CCNB más empleadas • Descriptivo • Consistencia • Consenso (de > 50% al máximo de 100%) • TR
Sturges y Whitfield (1995) [Inglés]	446 (Munsell)	Denominación monolexémica	20 x 2 (Ingleses) 18-25 años; 10 H, 10 M Todos estuds. o recién licenciados [446 x 20 x 2 = 17840]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: 6500K • Fondo: acr. ($\rho = 0,43$; $E_v = 1000 \text{ lx}$) • Tamaño: 5,2 cm x 3,3 cm, a 65 cm; unos 4,58° x 2,90° • Presentación secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 5 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrado en CCB y CCNB • Descriptivo y comparativo e inferencial (sexo) • Localiz.: espacio <i>Munsell</i> • Consenso (100%) • Colores focales (TR) • Centroides • Conexiones
Sturges y Whitfield (1997) [Inglés]		(denominación y TR)			<ul style="list-style-type: none"> • Centrado en las CCB y las CCNB más empleadas • Descriptivo • Consistencia • Consenso (de > 50% al máximo de 100%) • TR
Lin, Luo, MacDonald y Tarrant (2001a) [Inglés y chino mandarín]	200 (ISCC- NBS; brillantes)	Denominación libre (denominación escrita)	50 (Británicos) 24 H, 26 M 40 (Chinos) 20 H, 20 M Todos en edad madura (26 años de media) Todos estuds. o personal de la universidad [446 x 20 x 2 = 17840]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: luz de día (británicos); artificial 6500K (chinos) • Fondo: acr. ($\rho = 0,23$) • Tamaño: 15 cm x 11,5 cm, a 50 cm; unos 17° x 13° • Presentación secuencial y aleatoria (5 grupos de claridad) • Tiempo de exposición: no control. 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrado en cualquier CC • Frecuencia • Codificabilidad (consenso) • Categorización (7 y 4) • Validez de la traducción • Descriptivo y comparativo e inferencial (cultura y sexo)
Lin, Luo, MacDonald y Tarrant (2001b) [Inglés y chino mandarín]	1526 (NCS; semi-mate)	Señalización de prototipos y extensiones	20 (Británicos) 16-26 años 10 H, 10 M 20 chinos 10-33 años 10 H, 10 M Todos estuds. o personal de la universidad [446 x 20 x 2 = 17840]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: artificial 6500K • Fondo: acr. (blanco) • Fondo escena (blanco, chinos; $\rho = 0,18$, ingleses) • Tamaño: 1,2 cm x 1,5 cm, unos 2° • Presentación simultánea (páginas del atlas) 	<ul style="list-style-type: none"> • Descriptivo y comparativo e inferencial (cultura y sexo) • Centrado en CCB, modificadores y CCS • Centroides • Colores focales (más representativo) • Localización en el espacio <i>CIELAB</i>.
Lin, Luo, MacDonald y Tarrant (2001c) [Inglés y chino mandarín]	Véanse las especificaciones sobre Lin, Luo, MacDonald y Tarrant (2001a, 2001b)				<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de un modelo de denominación de color a partir de las bases de datos anteriores • Consenso (> 50%)

Una conclusión muy importante de estas dos investigaciones es que los criterios de *consenso* y *consistencia*, que como ya vimos anteriormente Crawford (1982) incluyó dentro de la definición de BCT, si se emplean como variables dependientes del análisis de los resultados obtenidos en un diseño experimental como el descrito, permiten diferenciar sin problemas entre CCB y CCNB. Sin embargo, no permiten diferenciar en absoluto entre CCB primarias y CCB derivadas. La tercera VD elegida, el *TR*, mostró exactamente este mismo patrón, razón por la cual los autores propusieron que su uso era igualmente válido que el de los criterios de consenso y consistencia de cara a diferenciar entre CCB y CCNB. Otra conclusión de los resultados es que las *diferencias individuales en denominación de color* aparecen sobre todo 1) para las muestras fronterizas entre dos ó más categorías, y 2) en lo que al uso de CCNB se refiere.

Con el objetivo de especificar la localización de las CCB en el espacio de color OSA, Boynton y Olson (1987) emplearon tres índices: 1) la localización de las muestras denominadas con *consenso* (100% de respuestas iguales), 2) la localización de los *foci* (aquellas muestras denominadas con consenso y cuyo TR fue el mínimo para cada categoría), y 3) la localización de los *centroides* de cada categoría (el vector promedio, calculado en el espacio *L, j, g*, calculado a partir de las coordenadas de cada una de las muestras que fueron denominadas mediante dicha categoría, ponderando en función del número de respuestas recibidas). Además, analizaron las conexiones existentes entre categorías (a excepción de las acromáticas *blanco* y *negro*), que eran reveladas gracias a una denominación inconsistente: dos categorías estaban conectadas si alguna muestra había sido denominada de forma inconsistente usando ambas categorías por la mayoría de los observadores. Los resultados más importantes fueron:

1. *El uso de las CCB dependió del nivel de claridad.* Este es uno de los resultados más importantes derivados de la investigación sobre CCB con colores de superficie. Efectivamente, no es cierto que cualquier categoría sea compatible con cualquier nivel de claridad. Concretamente:
 - *Verde* y *azul* son compatibles con todos los niveles de claridad.
 - *Amarillo* sólo existe a niveles altos de claridad.
 - *Rojo*, *marrón* y *morado*, sólo son compatibles con niveles bajos de claridad.

- *Naranja*, aunque es compatible con un rango bastante amplio de claridad, lo es sobre todo a niveles medios.
 - *Rosa* es compatible con niveles de claridad situados entre los de *naranja* (medio) y *amarillo* (alto).
2. *Los centroides no coincidieron con los foci*, que por lo general fueron muestras con mayor saturación (en el caso de las CCB cromáticas) que la derivada del cálculo de un índice de tendencia central como es el centroide. Sin embargo, los autores siguieron defendiendo el uso de centroides para localizar colores de superficie en el espacio de color, entre otras cosas porque la *probabilidad de uso de una CCB* disminuía, en la mayoría de las direcciones, al aumentar la distancia a su centroide. Por el contrario, en la frontera entre categorías, aumenta la probabilidad de que la denominación sea inconsistente, así como de emplear CCNB.
 3. Las *CCB derivadas* (*marrón, rosa, naranja, morado y gris*) se mostraron tan fundamentales como las CCB primarias (*blanco, negro, rojo, verde, amarillo, azul*) para denominar las sensaciones cromáticas suscitadas por estímulos de superficie. Por ejemplo, no hubo conexión entre las categorías de *rojo* y *amarillo*: *naranja* sirve de puente entre ambas, tal y como lo hace *amarillo* entre *naranja* y *verde*. Luego la distinción entre CCB primarias y derivadas, nuevamente, no puede realizarse sobre la base de los resultados obtenidos en la tarea de denominación monolexémica libre (todas ellas se emplean con consenso y con consistencia, como hace patente la propia definición de CCB).
 4. Se encontró una zona en el espacio de color (en las proximidades de *beige*, como veremos en breve), un *hueco*, donde no se emplea ninguna CCB, sino varias CCNB con mucha idiosincrasia.

Merece la pena destacar, considerando el punto 2, un aspecto fundamental acerca de la distribución de las CCB en el espacio de color: es obvio que tales distribuciones *no son isotrópicas* (dentro de la extensión del espacio de color donde se emplea una categoría, su probabilidad de uso depende de la dirección concreta que se tome).

Desgraciadamente, como reconocieron los propios autores, el muestreo de estímulos realizado en las investigaciones de Boynton y Olson (1987, 1990), presentaba las siguientes desventajas: las categorías *acromáticas*, así como la de *rojo*, no estaban

bien representadas. Sturges y Whitfield (1995, 1997) publicaron sendos artículos en los que replicaron los resultados obtenidos por Boynton y Olson (1987, 1990), pero mejorando ciertos aspectos metodológicos, como puede consultarse en la Tabla 4.7. Concretamente, llevaron a cabo un mejor *muestreo* del espacio de color, especialmente en lo que se refiere a las categorías *acromáticas*, *rojo*, y las CCNB, y además contaron con un mayor número de observadores (20 frente a los 7 de Boynton y Olson, 1987, o los 9 de 1990).

Los objetivos concretos de Sturges y Whitfield (1995, 1997) eran: 1) la localización concreta de las CCB en el espacio Munsell, 2) su correspondencia con la localización en el espacio OSA, 3) confirmar la validez de las 11 CCB de Berlin y Kay, y 4) corroborar la ausencia de diferencias encontrada por Boynton y Olson entre las CCB primarias y derivadas. Los resultados replicaron los encontrados por Boynton y Olson (1987, 1990) en lo que se refiere a la validez de la *consistencia*, el *consenso*, y el *tiempo de reacción* de cara a diferenciar entre las CCB y las CCNB, así como su escasa validez para diferenciar entre CCB primarias y derivadas. Las diferencias más importante entre ambos estudios se refieren al uso de CCNB: 1) los observadores emplearon CCNB diferentes en ambos estudios, y 2) a diferencia del trabajo de Boynton y Olson (1990), Sturges y Whitfield (1997) no encontraron que el uso de un mayor número de CCNB afectara a la consistencia con la que se usan las CCB. Como una explicación plausible, los autores apuntaron a que sus observadores usaron CCNB eminentemente para zonas fronterizas, y no para dividir regiones de CCB, lo que sí habría causado una disminución de la consistencia de las CCB.

Respecto al despliegue de las CCB en el espacio de color, los resultados fundamentales se describen en Sturges y Whitfield (1997), y se describen a continuación en el mismo orden que se presentaron los resultados de Boynton y Olson (1987), para facilitar la comparación:

1. *El uso de las CCB dependió del nivel de claridad*, tal y como encontraron Boynton y Olson (1987).
2. *Los centroides* (calculados a partir de las dimensiones *Value*, *Hue*, y *Chroma* del sistema Munsell) *no coincidieron con los foci*, resultado que replica el encontrado por Boynton y Olson (1987). Pero además, tanto los *centroides* como los *foci* de las

CCB cromáticas (excepto el *foci* de rosa), fueron más saturados que en el estudio previo de Boynton y Olson (1987), y además los *foci* fueron muy parecidos a los encontrados por Berlin y Kay (1969). Esta es la diferencia fundamental entre ambas investigaciones, y se debe a las diferencias en los atlas empleados: el sistema Munsell tiene muestras mucho más saturadas que el sistema OSA.

3. Las *CCB derivadas* se mostraron tan fundamentales como en el estudio previo de Boynton y Olson (1987).
4. El color compuesto *beige/cream* podría ser el “*color perdido*” al que hicieron referencia Boynton y Olson (1987). *Beige* se reveló como la categoría cromática más cercana a ser básica: siendo (1) la más consistente, (2) la única que superó criterio de consenso (> 50% o más), y (3) la que alcanzó los menores TR de todas las CCNB.

Los trabajos comentados han sentado una sólida base para el estudio científico de las CCB (consúltense, por ejemplo, los trabajos de Lin et al, 2001a, 2001b y 2001c). Como se comentó en la introducción de esta tesis, nuestro equipo de investigación siguió una línea de trabajo para establecer las CCB de nuestro idioma, que mostraron una equivalencia prácticamente completa con las del inglés.

1.4.2. DENOMINACIÓN DEL COLOR EN OBSERVADORES CON ALTERACIONES EN LA VISIÓN DEL COLOR

1.4.2.1. DENOMINACIÓN DEL COLOR EN OBSERVADORES DALTÓNICOS

Es de esperar que la reducción de la capacidad de discriminación cromática propia de los observadores daltónicos (véase el apartado 1.3.1) influya sobre su denominación de estímulos de color. O lo que es lo mismo: si se requiere de un tricrómatas normal que nombre dos *estímulos metaméricos* (físicamente diferentes, pero perceptivamente iguales) presentados simultáneamente, *lo esperable es* que ambos estímulos recibiesen el mismo nombre, porque de hecho son indistinguibles para el observador. Partiendo de este razonamiento, y puesto que para los observadores daltónicos existen muchos más estímulos *a priori* metaméricos (véase la Figura 3.6 donde se muestran varias líneas de confusión para diferentes tipos de observadores dicrómatas), *lo esperable sería* que estímulos muy diferentes para un tricrómatas normal fuesen nombrados de la misma manera por observadores daltónicos.

Las Tablas 4.8 y 4.9 recogen algunas de las investigaciones realizadas para estudiar la denominación de color en observadores daltónicos. Comenzaremos describiendo los aspectos fundamentales de las investigaciones que han utilizado estímulos **monocromáticos** (Tabla 4.8), distinguiendo claramente entre, por una parte, aquellas que han controlado la influencia del brillo (presentando estímulos igualados en esta dimensión perceptiva), y, por otra parte, aquellas que han empleado estímulos isoluminates (igualados por tanto en luminancia estándar).

Esta distinción resulta de vital importancia, porque las funciones de denominación del color establecidas experimentalmente para tricrómatas normales están elaboradas a partir de la presentación de estímulos isoluminantes. Pero, habida cuenta de las diferencias existentes entre las funciones de sensibilidad espectral de tricrómatas normales y dicrómatas (Tabla 3.2 y Figura 3.3), estos últimos (sobre todo los protanopes) perciben las diferentes longitudes de onda del espectro visible, si se presentan con la misma luminancia, con un brillo diferente.

Tabla 4.8. Trabajos en los que se ha estudiado la denominación del color de estímulos monocromáticos en observadores daltónicos. En el caso de haber más de un experimento, las columnas de tarea y estímulos se refieren exclusivamente al experimento de denominación de color. P: protanope; D: deuteranope; DA: deuteranómalo, TN: tricrómata normal.

Investigación	Objetivo	Observadores	Tarea	Estímulos
Boynton y Scheibner (1967) Scheibner y Boynton (1968)	Demostrar la existencia de discriminación R-V en observadores protanopes y deuteranopes	3 P 5 D (sólo en 1968) 2 TN	Denominación restringida empleando 1 ó 2 de los términos: R, Am, V y Az	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 490-630 nm 1000, 500, 250 y 125 td (580 nm) Tamaño: 3° Presentación foveal Duración: 300 ms Modo: apertura/ iluminante Fondo: sin y con fondo (15°x15°) Brillo igualado
Nagy y Boynton (1979)	Estudiar el mecanismo que posibilita la existencia de discriminación R-V en observadores protanopes y deuteranopes con estímulos de gran tamaño	4 P 4 D 2 TN	Denominación restringida empleando 1 de los términos: R, Na, Am, y V	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 530-650 nm 100 y 10 td (590 nm) Test: anillo de 12° de diámetro externo y 4° de diámetro interno Presentación extrafoveal Duración: 300 ms Modo: apertura/ iluminante Fondo: sin fondo Brillo igualado
Paramei (1996)	Reconstruir un espacio de color a partir de la denominación del color	1 P 1 DA extremo 3 TN	<i>Denominación restringida</i> empleando 1, 2 ó 3 de los términos: R, Am, V, Az, B.	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 425-675 nm Tungsteno y filtro neutral 25 cd/m² Tamaño: 2,2° Presentación: foveal, maxwelliana y monocular Duración: 3 s Modo: apertura/ iluminante Fondo: fondo oscuro (6,6°) Luminancia igualada
Paramei, Bimler y Cavonius (1998)	Estudiar la denominación del color de protanopes en función de la luminancia	2 P (H; 23 años) 2 TN (M; 25 y 30 años)	<i>Denominación restringida</i> empleando 1, 2 ó 3 de los términos: R, Am, V, Az, B.	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 405-675 nm Tungsteno y filtro neutral (2850 K) 200, 20, 2, 0,2 cd/m² Tamaño: 2,2° Presentación: foveal, maxwelliana y monocular Duración: 3 s Modo: apertura/ iluminante Fondo: oscuro Luminancia igualada
Wachtler, Dohrmann y Hertel (2004)	Derivar un modelo de la apariencia del color en daltónicos dicrómatas	4 P 3 D (6 H, 1 M)	<i>Escalamiento de tono</i> empleando los términos: R, Am, V, Az.	<ul style="list-style-type: none"> Rango: 420?-640 nm 920 y 230 td Tamaño: 2° Presentación: foveal Duración: ? Modo: iluminante Fondo: 10 y 920 td Luminancia aprox. igualada
Bimler y Paramei (2004) Bimler y Paramei (2005)	Estudio del efecto BB en observadores con visión normal del color y protanopes	Los mismos que en Paramei, Bimler y Cavonius (1998)	<i>Denominación restringida</i> empleando 1, 2 ó 3 de los términos: R, Am, V, Az, B.	<ul style="list-style-type: none"> Idénticas a Paramei, Bimler y Cavonius (1998), excepto: 0,2, 2, 10, 20, 100 y 200 cd/m²

Este hecho puede constituir una importante fuente de contaminación en los resultados encontrados, al existir la posibilidad de que los observadores dicrómatas utilicen los términos de color sin basarse exclusivamente en la información perceptiva sobre el mismo, sino también en la información perceptiva sobre la *intensidad* de la estimulación. Por ejemplo, en una tarea de denominación de color en la que se presentan estímulos isoluminantes, un observador portanope podría emplear el término rojo únicamente ante aquellos estímulos que percibiera con menos brillo (y que se corresponderían con las longitudes de onda larga del espectro).

Bajo el esquema de la teoría de los procesos oponentes, al intentar extender la utilidad de dicha teoría para explicar la visión dicrómata, Hurvich y Jameson (1955) asumieron la “*ausencia o completa falta de funcionalidad del sistema cromático rojo-verde*” tanto en protanopes como en deuteranopes (p. 611). La consecuencia lógica de este supuesto, como hicieron explícito los propios autores (p. 613 y Figura 11 del mismo trabajo), es que sería esperable obtener unos coeficientes de tono para el espectro visible con valores constantes y extremos, de forma que los daltónicos dicrómatas únicamente utilizasen los términos *azul*, *acromático* (en torno al punto neutral concreto en función del tipo de daltónico de que se trate) y *amarillo*, hallándose únicamente diferencias en saturación, pero no en el tono, en función de la longitud de onda.

Pero, sencillamente, esto no es lo que sucede: además de *azul* y *amarillo*, los dicrómatas emplean (como mínimo) los términos *rojo* y *verde* para describir la apariencia del espectro. Scheibner y Boynton (1968, donde se incluyen los resultados publicados previamente en Boynton y Scheibner, 1967) aplicaron (entre otros) el mismo método de denominación de color que Boynton y Gordon (1965), encontrando el sorprendente resultado de que “*los dicrómatas, en general, no responden a la parte del espectro de longitud de onda larga como cabría esperar a partir de la hipótesis de la isocromaticidad*” (p. 1154), ya que tanto los observadores protanopes como los deuteranopes emplearon con mayor frecuencia la categoría *rojo* a medida que aumentaba la longitud de onda, a pesar de *lo esperable* a partir del cumplimiento estricto de la hipótesis de la reducción, que legitima el uso de líneas de confusión en un diagrama de cromaticidad. Efectivamente, puesto que para ambos tipos de observadores las coordenadas cromáticas de los estímulos espectrales comprendidos entre 530 y 630 nm se alinean formando sendas líneas de confusión, (a modo de ejemplo, obsérvense las

flechas negras de la Figura 3.6, que señalan la localización de los estímulos monocromáticos empleados en un anomaloscopio), *lo esperable* sería que estos estímulos (puesto que habían sido igualados en brillo) fuesen completamente metaméricos, lo que haría imposible obtener un patrón de resultados como el encontrado.

Los autores hipotetizaron sobre la naturaleza del mecanismo que posibilita la existencia de cierta discriminación residual “*rojo-verde*” en protanopes y deuteranopes, mencionando tres posibilidades: 1) la influencia de los bastones, 2), la influencia de los conos S, y por último 3) la existencia residual del tercer tipo de cono. Comparando la denominación de color de protanopes y deuteranopes bajo condiciones que bien permitían o bien neutralizaban la respuesta de los bastones, Nagy y Boynton (1979) demostraron que aunque esta clase de fotorreceptores podría influir en la discriminación residual “*rojo-verde*”, no eran los únicos responsables de esta capacidad, apostando decididamente por la existencia de un tercer tipo de cono.

Tomados en su conjunto, los estudios de denominación de color realizados con estímulos espectrales *igualados en brillo* (de tamaño $\geq 3^\circ$), permiten destacar los siguientes resultados de interés sobre la visión del color de observadores diagnosticados como dicrómatas en el sentido clásico:

1. La mayoría de estos observadores muestran cierto grado de **discriminación en el rango espectral 530-700 nm**. Este hecho empírico es congruente con los resultados que se mencionaron en el apartado 1.3.1.1 bajo el epígrafe *Tricromatismo en observadores dicrómatas ante estímulos de gran tamaño*, obtenidos empleando el método psicofísico de igualación del color.
2. A pesar de lo indicado en el punto anterior, existe un **solapamiento** claro entre las funciones que describen el uso de los términos **rojo** y **verde**.
3. La denominación de estos observadores depende fuertemente de la **luminancia** de los estímulos presentados, lo que contrasta con la magnitud “limitada” del efecto *Bezold-Brücke* en tricrómatas normales. A intensidades más altas tienden a emplearse con mayor frecuencia los términos *amarillo* y *naranja*, mientras que ante estímulos de menor intensidad, se utilizan más frecuentemente los términos *rojo* y *verde* (Scheibner y Boynton, 1968; Nagy y Boynton, 1979). Esta

dependencia parece mayor en observadores protanopes (Nagy y Boynton, 1979; véase también Paramei, 1996).

4. El término **verde** parece emplearse para estímulos poco saturados y muestra un máximo uso en torno a **510 nm** (Scheibner y Boynton, 1968; Paramei, 1996).
5. Entre los protanopes y los deuteranopes, existe mucha **variedad intragrupo**, de forma que algunos observadores emplean los términos de color de una manera muy parecida a como lo hacen los tricrómatas normales, mientras que otros observadores hacen un uso de los términos que casi concuerda con la hipótesis de la reducción, los a veces denominados “*dicrómatas verdaderos*” (por ejemplo, el protanope TJ en Scheibner y Boynton, 1968, o el protanope KE en Nagy y Boynton, 1979).
6. Aunque a partir de las funciones de denominación de color es difícil diferenciar entre protanopes y deuteranopes (Scheibner y Boynton, 1968), algunos estudios muestran que, como grupo, los **protanopes** muestran un **uso más empobrecido** de los términos de color que los deuteranopes (Nagy y Boynton, 1979).

Bimler y Paramei (2005, 2004, véase también Paramei, Bilmer y Cavonius, 1998), empleando estímulos pequeños (2,2°) e *isoluminantes* (no igualados por tanto en brillo), establecieron las funciones de denominación del color para dos observadores **protanopes**. Es importante recalcar que, además del uso de los términos *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul*, en estas investigaciones también se permitió el uso del término *blanco*. La razón es que los autores estaban interesados en el estudio de la saturación de las diferentes longitudes de onda del espectro visible en este tipo de observadores. Sin embargo, al igual que los propios autores, seguiremos empleando el concepto de “funciones de denominación de color”. Estas investigaciones pusieron de manifiesto que para:

1. Longitudes de onda corta (405-490 nm):
 - a. Se empleó el término *azul*, combinado con el término *blanco*, de tal forma que a luminancias más altas el uso de este segundo término fue superior. Este hecho, que también se encontró en tricrómatas normales, estaba presente de forma mucho más pronunciada en los protanopes. Los autores lo interpretaron como una prueba de la pérdida de saturación asociada al aumento de la luminancia en esta parte del espectro.

- b. A diferencia de lo que ocurre en observadores con visión normal del color, no se empleó el término *rojo*. Como comentaremos a continuación, Wachtler, Dohrmann y Hertel (2004) encontraron el resultado opuesto (consúltese la Figura 2 de dicho trabajo).
- 2. Longitudes de onda próximas al punto neutral (en torno a 494 nm para el estímulo equienergético, pero en torno a longitudes de onda algo mayores para el blanco de referencia empleado, iluminante A: 2850 K), se empleó el término *banco* (que de hecho alcanzó su mayor frecuencia de uso en torno a 500 nm), combinado con el término *verde*. Este último también se empleó para describir el blanco empleado en el experimento para las luminancias más bajas.
- 3. Longitudes de onda media y larga (510-675 nm):
 - a. El término *rojo* se empleó con mayor frecuencia ante las longitudes de onda más largas, incrementándose su uso a menores luminancias.
 - b. El término *amarillo* se empleó fundamentalmente ante longitudes de onda medias y largas presentadas a intensidades más altas.
 - c. El término *verde* se empleó fundamentalmente ante longitudes de onda medias presentadas a baja intensidad.
 - d. Las funciones correspondientes a los términos *rojo* y *verde* se solaparon considerablemente.

Para terminar con este repaso de las investigaciones sobre la denominación del color de estímulos monocromáticos en dicrómatas, comentaremos con cierto detalle el trabajo de Wachtler, Dohrmann y Hertel (2004), puesto que en él se propone un modelo que trata de dar cuenta de la existencia de un mecanismo *rojo-verde* en este tipo de observadores, además del *azul-amarillo*.

En la investigación citada, los autores emplearon el método de escalamiento de tono para estudiar la visión del color en protanopes y deuteranopes ante estímulos monocromáticos (aproximadamente) igualados en luminancia. Permitieron el uso de los términos *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul*, sin impedir el uso de cualquier otro si los observadores lo necesitaban (algo que no ocurrió en ningún caso). Los resultados que encontraron fueron esencialmente iguales a los obtenidos mediante el método de denominación de color, excepto en un aspecto muy importante que ya ha sido comentado anteriormente: el término *rojo* se empleó, junto con *azul*, para describir la

apariciencia de la parte corta del espectro. Este detalle tiene una importancia crucial a la hora de postular las características esenciales de los mecanismos cromáticos de este tipo de observadores (tanto es así, que en él reside una de las evidencias más aludidas cuando se trata de defender la existencia de las sensaciones de rojo y verde en este tipo de observadores).

¿De qué manera, según los autores, se hace posible la existencia del mecanismo *rojo-verde*? A este respecto el trabajo resulta tremendamente original, porque ofrece una interesante hipótesis ideada precisamente para explicar cómo pueden aparecer dos mecanismo cromáticos oponentes a pesar de tener únicamente dos tipos de conos (los S y bien los M o los L). Según el modelo propuesto, mediante un proceso no lineal, concretamente una compresión en la respuesta de los conos M en protanopes (o L en deuteranopes), se genera una curva espectral $\hat{M}(\lambda)$ (o $\hat{L}(\lambda)$) diferente de $M(\lambda)$ (o $L(\lambda)$)⁹. Esta nueva curva espectral se combina de forma oponente con $S(\lambda)$, lo cual da lugar (previa rectificación) a $\tilde{Q}(\lambda)$. Esta es la base para que, funcionalmente, la visión del color de observadores dicrómatas parta de *tres*, en lugar de dos, curvas espectrales diferentes, como puede observarse en la Figura 4.2A (de hecho, los autores denominan a esta fase “pseudo-tricromática”).

A partir de estas tres funciones de respuesta espectral, los autores proponen una combinación oponente que da lugar a los mecanismos cromáticos *rojo-verde* y *amarillo-azul* (de manera idéntica a como hacen diferentes modelos de visión normal del color a partir de $S(\lambda)$, $M(\lambda)$ y $L(\lambda)$), como ilustra la Figura 4.2B. Por último, tal y como vimos para tricrómatas normales (apartado 1.4.1.1), a partir de las funciones de valencia cromática de estos dos mecanismos oponentes, se calculan las proporciones de tono, dando lugar a las funciones de escalamiento de tono representadas en la Figura 4.2C.

⁹ La compresión en la respuesta tiene como consecuencia que la nueva curva espectral tiene una mayor anchura de banda que la curva original, de tal forma que en términos relativos muestra una mayor sensibilidad en los extremos. Los autores optaron por una sencilla función potencial (ecuación (9) del trabajo original) para modelizar la compresión de la respuesta.

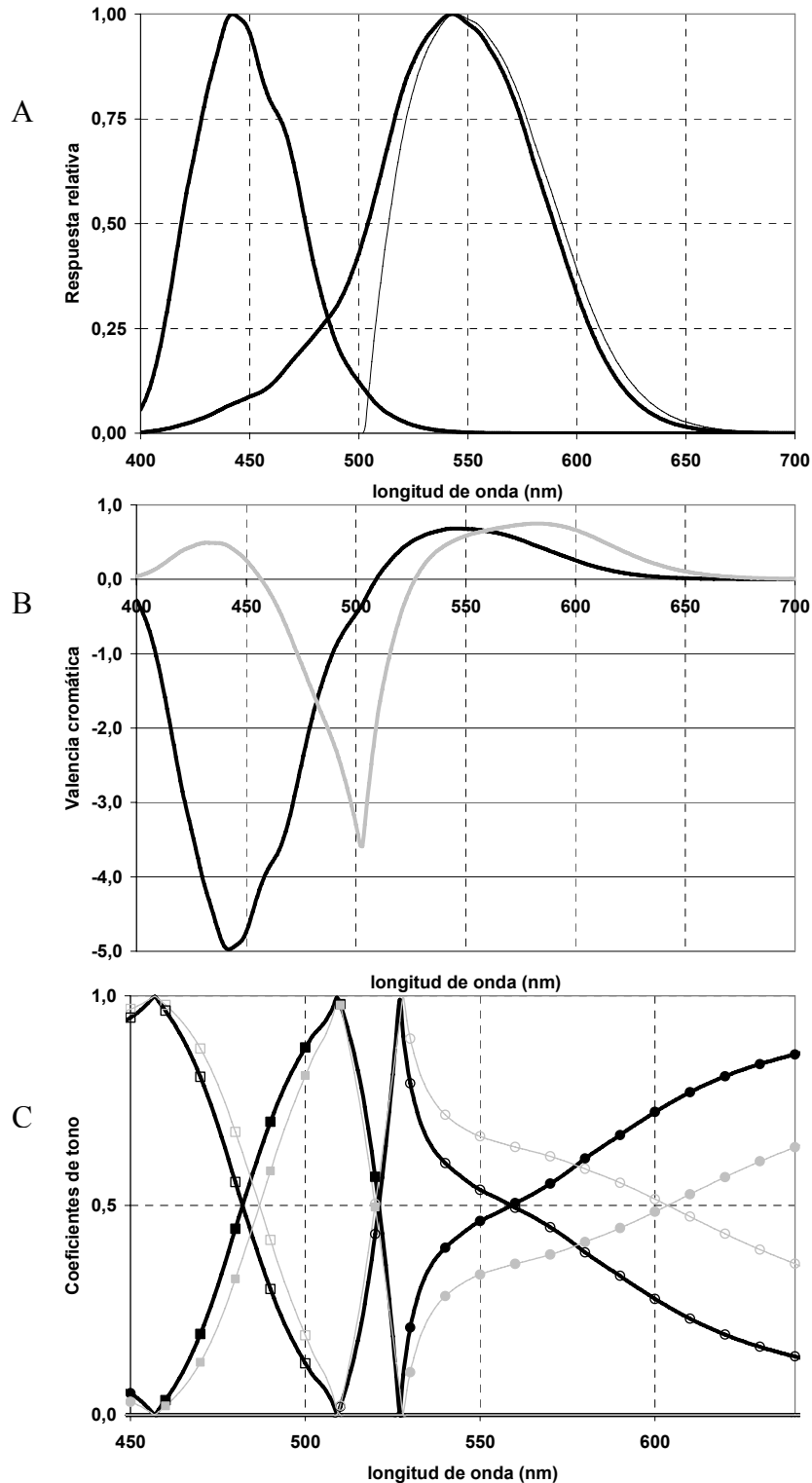


Figura 4.2. Modelo de visión del color en protanopes propuesto por Wachtler, Dohrmann y Hertel (2004). A: Funciones de respuesta espectral $S(\lambda)$, $M(\lambda)$ y $\bar{Q}(\lambda)$ (línea más delgada, ver texto). B: Funciones de valencia cromática de los mecanismos *rojo-verde* (gris) y *azul-amarillo* (negro). C: Funciones de escalamiento de tono (círculos sólidos: *rojo*; cuadrados sólidos: *verde*; círculos blancos: *amarillo*; cuadrados blancos: *azul*) para dos niveles diferentes de intensidad (negro: 320 td; gris: 920 td). Esta figura ha sido construida a partir de las Figuras 4 y 5 del artículo original, empleando las ecuaciones (3)-(9) y los parámetros especificados en la Tabla 2 de dicho trabajo.

Según los autores, el modelo propuesto permite explicar: 1) la afirmación de muchos dicrómatas de que experimentan las sensaciones de rojo y verde como algo *diferente* de las de amarillo y azul; 2) el estrecho rango espectral para el que se emplea el término *verde*, así como su máximo uso en torno a los 510 nm, (véase la Figura 4.2B y 4.2C); 3) el uso del término *rojo* en la parte corta del espectro (Figura 4.2B y 4.2C); y 4) la exagerada dependencia que muestra el comportamiento de los dicrómatas en función del nivel de intensidad de la estimulación, caracterizado por un mayor uso de *rojo* y *verde* a intensidades bajas y de *amarillo* y *azul* a intensidades altas (véase la Figura 4.2C).

Pero a la vez, este modelo, por sí solo, es incapaz de simular otros importantes aspectos de la *denominación del color* en dicrómatas, como el hecho de que las funciones de *rojo* y *verde* se solapan considerablemente. Evidentemente, un modelo como el propuesto, que se basa en la existencia de mecanismos oponentes, uno de los cuales es *rojo-verde*, nunca puede predecir este tipo de resultado, como muestran las predicciones representadas en la Figura 4.2C. Los autores comentan explícitamente que para simular este tipo de comportamiento sería necesario modelizar de alguna manera el efecto del *ruido* (p. 2851), ya que, aún existiendo en dicrómatas las sensaciones de rojo y verde, no son tan robustas como en tricrómatas normales.

Se comentó al comienzo de este capítulo (apartado 1.4.1) que para estudiar la relación entre tono y longitud de onda, además de la denominación de color y la cancelación de tono, se ha empleado la técnica de *escalamiento multidimensional* (MDS). En algunas investigaciones se han empleado los datos derivados de la aplicación del método de denominación de color para emplear dicha técnica, con el objetivo de reconstruir y poder comparar los espacios de color perceptivos de observadores tricrómatas normales y daltónicos.

En este contexto, el paso previo para poder aplicar el escalamiento multidimensional es obtener una matriz de (di)similaridades entre los estímulos empleados en los experimentos de denominación. Para conseguir esta matriz, 1) en primer lugar se obtiene un vector para cada estímulo (que describe la apariencia de dicho estímulo en función de los términos cuyo uso se haya permitido en el experimento), 2) se computa la diferencia (o similitud) entre todos los pares de

estímulos posibles, lo cual da lugar a una matriz de (di)similaridad, que 3) finalmente sirve de entrada para el análisis de escalamiento multidimensional.

El resultado más sorprendente derivado de la aplicación del MDS a los datos de denominación de color en daltónicos puede resumirse de la siguiente manera: casi siempre se obtiene una dimensión que puede interpretarse como discriminación *rojo-verde* (con diferente magnitud para diferentes observadores). No obstante, este resultado se deriva del hecho de que en las funciones de denominación de color el uso del término *rojo* depende de la longitud de onda, y lo hace de una forma similar a como ocurre en tricrómatas normales. Es decir: nótese que, al menos cualitativamente, este tipo de análisis no aporta mucha más información que las propias funciones en sí mismas.

A modo de ejemplo, se comentarán los resultados más importantes derivados de la aplicación de este tipo de análisis, y que pueden encontrarse en investigaciones que ya han sido comentadas previamente (de hecho, Galina Paramei y David Bimler son unos de los mayores defensores de la aplicación del MDS a los datos derivados del método de denominación de color):

- Boynton y Scheibner (1967, p. 219-220) representaron las configuraciones derivadas del procedimiento de MDS en un espacio **bidimensional**. Para un tricrómata normal (el propio R. M. Boynton, Figura 11) el resultado del análisis permitió reproducir el conocido círculo cromático, ordenando los estímulos en dos dimensiones interpretables como *rojo-verde* y *amarillo-azul*. Para observadores protanopes, se seguían manteniendo estas dos dimensiones, confirmando los hallazgos de discriminación residual y la mayor influencia de la luminancia en estos observadores (Figuras 12 y 13). Recuérdese que los resultados de esta investigación poseen un valor especial porque los estímulos estaban igualados en brillo. Por el contrario, en el resto de investigaciones que comentaremos a continuación se emplearon estímulos isoluminantes, y se permitió emplear el término *blanco*, además de los cromáticos *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul*.
- Paramei (1996) concluyó que eran necesarias **tres dimensiones** para reconstruir los espacios de color, tanto en tricrómatas normales como en el observador protanope y el deuteranómalo extremo que realizaron el experimento. Estas

dimensiones fueron interpretadas como *rojo-verde*, *amarillo-azul* y *saturación*. La autora concluyó que los resultados podían tomarse como una prueba de que en este tipo de observadores existe una discriminación de la saturación más fina de la que existe en tricrómatas normales, que actuaría como una especie de compensación para contrarrestar la debilitada discriminación en el mecanismo *rojo-verde* (en otras palabras, Paramei defendió una especie de aprendizaje perceptivo).

- Paramei, Bimler y Cavonius (1998), por el contrario, establecieron **tres dimensiones** en tricrómatas normales (*rojo-verde*, *amarillo-azul* y un componente *acromático* relacionado tanto con el brillo como con la saturación), pero solamente **dos en protanopes**, interpretadas como *rojo-azul* y *brillo*. Los autores concluyeron que la discriminación de estos observadores mejoraba a nivel mesópico ($0,2 \text{ cd/m}^2$) frente a lo que ocurría a nivel fotópico (200 cd/m^2 , donde prácticamente sólo se empleaban los términos *amarillo* y *blanco*).
- Bimler y Paramei (2004, 2005) establecieron las **tres dimensiones** *rojo-verde*, *amarillo-azul* y “*blancura*” (desaturación) para tricrómatas normales, y mantuvieron tres dimensiones para los protanopes, a pesar de que no podían interpretarse de la misma manera. La razón para mantener tres dimensiones es que la geometría de la solución del MDS resultó (aproximadamente) en una esfera, lo cual permitía establecer cualquier estímulo a partir de dos coordenadas angulares (azimut y altitud). A partir de dichas coordenadas, los autores estudiaron el efecto *Bezold-Brücke* en tricrómatas normales y su análogo en protanopes (concluyendo que en estos observadores el efecto BB no puede disociarse de un cambio en la saturación percibida).

Todo lo dicho hasta ahora presenta serias limitaciones de cara a predecir el comportamiento de observadores daltónicos ante estímulos de superficie, debido tanto a los estímulos empleados (monocromáticos) como a los términos de color permitidos (únicamente *rojo*, *verde*, *amarillo*, *azul*, *naranja* y *blanco*, como puede observarse en la columna “Tarea” de la Tabla 4.8). A continuación se describen algunos de los trabajos más influyentes en el campo de estudio de la denominación de color de **estímulos de superficie** por parte de observadores daltónicos (Tabla 4.9).

Tabla 4.9. Trabajos en los que se ha estudiado la denominación de color de estímulos de superficie en observadores daltónicos. P: protanope; D: deuteranope; T: tritanope; DA: deuteranómalo; PA: protanómalo; TN: tricrómatas normales.

Investigación	Estímulos: N (atlas) Tarea (y VVDD experimentales)	Observadores [nº total de Observaciones]	Condiciones de observación	Algunas características del Análisis
Jameson y Hurvich (1978)	16 (Panel D-15) Ordenación de tonos y Denominación libre (denominación)	3 P (?) 3 D (?) 1 TN (?) 7 x 1 [16 x 7 = 112]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: Macbeth • Fondo: acr. (<i>negro</i>) • Tamaño: sin control riguroso de la distancia) • Presentación simultánea • Tiempo de exposición: ilimitado 	<ul style="list-style-type: none"> • Descriptivo y comparativo • Diferencias entre tareas de denominación de color y de ordenación por similitud
Montag y Boynton (1987)	424 (OSA) Denominación monolexémica (denominación; TR en el Exp. 1)	2 P (H) 2 D (H) 2 TN (M) 6 x 2 18-25 años Estudiantes [424 x 6 x 2 = 5088]	<p>EXPERIMENTO 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: 3200K • Fondo: acr. ($\rho = 0,2$; $L_v = 40$ cd/m², $E_v = 630$ lx) • Tamaño: 3,8 cm², a 60 cm; unos 3,6°) • Presentación secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 5 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrado en las diferencias entre las CCB y las CCNB • Descriptivo y comparativo • Consistencia (Exp. 1 y 2) • TR (Exp. 1) • Localización de los centroides en el espacio L, j, g. • Conexiones (Exp. 1)
		1 D (H) 1 TN (M)	<p>EXPERIMENTO 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño: 1° (a 60 cm) • Presentación monocular, secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 50 ms 	
		2 x 2 Estudiantes [424 x 6 x 2 = 848]	<p>EXPERIMENTO 3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Tamaño: 3,8 cm², a 60 cm; unos 3,6°) • Presentación monocular, secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 5 s • Cone plateau 	
Montag (1994)	215 (OSA) Denominación monolexémica (denominación; TR en el Exp. 1)	2 P (H) 2 D (1 H y 1 M) 1 T (M) 1 TN (H) 6 x 2 ¿Edad? Estudiantes [215 x 6 x 2 = 2580]	<p>EXPERIMENTO 1</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: 3200K • Fondo: acr. ($\rho = 0,2$; $L_v = 74$ cd/m²) • Tamaño. Grande: 3,8 cm², a 60 cm (unos 3,6°). Pequeño: 0,75 cm², a 60 cm (1° aprox.) • Presentación monocular, secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 5 s (tamaño grande); 60 ms (grande y pequeño) 	<ul style="list-style-type: none"> • Centrado en las diferencias entre las CCB y las CCNB (Exp. 1) • Descriptivo y comparativo • Consistencia (Exp. 1) • TR (Exp. 1) • Localización de los centroides en el espacio L, j, g. Ajuste de un plano a los centroides obtenidos • Conexiones (Exp. 1) • Análisis de la iluminancia retiniana escotópica (Exp. 2 y 3)
		1 P (H) 3 D (¿?) 1 T (M) 2 TN (1 H y 1 M) 7 x 2 ¿Edad? Estudiantes [215 x 7 x 2 = 3010]	<p>EXPERIMENTO 2</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fondo: acr. ($\rho = 0,2$). Iluminación Baja: $L_v = 25$ cd/m². Media: $L_v = 74$ cd/m². Alta: $L_v = 360 - 410$ cd/m². • Tamaño. Grande: 3,8 cm², a 60 cm (unos 3,6°). • Presentación monocular (2 obs.) y binocular (5 obs.), secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: 5 s. 	
		3 P (¿?) 2 D (¿?) 2 TN (¿?) 6 x 2 ¿Edad? Estudiantes [215 x 7 x 2 = 3010]	<p>EXPERIMENTO 3</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fondo: acr. ($\rho = 0,2$). Iluminación Media: $L_v = 74$ cd/m². Alta: $L_v = 524$ cd/m². • Tamaño. Grande: 3,8 cm², a 60 cm (unos 3,6°). • Presentación monocular, secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición. Prolongado: 5 s. Breve: 60 ms • Cone plateau 	

Tabla 4.9. (Continuación).

Investigación	Estímulos: N (atlas) Tarea (y VVDD experimentales)	Observadores [nº total de Observaciones]	Condiciones de observación	Algunas características del Análisis
Lillo, Davies, Collado, Ponte y Vitini (2001)	11 (Color-Aid) Denominación monolexémica (denominación)	12 P (?) 18 D (?) 29 TN (?) 5-9 años 59 x 1 [11 x 59 = 649]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: Natural (4000-6500 K) solo o combinada con artificial (3210 K) • Fondo: acr. (<i>gris neutro</i>: $\rho = 0,2$) • Tamaño: 5 cm², a 35 cm; unos 8°) • Presentación binocular, secuencial y aleatoria • Tiempo de exposición: ilimitado 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación de las predicciones de un modelo de predicción de errores en dicrómatas con el comportamiento empírico de estos
Lillo, Vitini, Caballero y Moreira (2001)	12 (Color-Aid) Denominación monolexémica (denominación)	12 P (?) 18 D (?) 29 TN (?) 5-9 años 59 x 1 [12 x 59 = 708]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: Fluorescente (6300 K; $E_v = 1280$ lx) • Fondo: acr. ($\rho = 0,53$) • Tamaño de los círculos: 17, 7 y 1,9 mm de diámetro, a 40 cm; unos 2,4°, 1° y 0,27°) • Tamaño de las líneas: 3,5, 1,9 y 1 mm de ancho, a 40 cm; unos 0,5°, 0,27° y 0,14°; y 20 mm de largo, unos 2,9°) • Presentación binocular, simultánea, contrabalanceando los efectos de la forma (intrasujeto) • Tiempo de exposición: 2 s (a juicio del experimentador) 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación de las predicciones de dos modelos alternativos de predicción de errores en dicrómatas con el comportamiento empírico de estos
Cole, Lian, Sharpe, Lakkis (2006)	10 (a juicio de los experimentadores) Denominación libre (denominación)	8 P (?) 11 D (?) 5 PA (moderados) 16 DA (mods.) 15 PA (leves) 44 DA (leves) 20 TN (H) 8-52 años (28,2 +-10,6) 119 x 2 x 3 x 2 = [10 x 119 x 2 x 3 x 2 = 14280]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: Fluorescente (6300 K; $E_v = 1280$ lx) • Fondo: acr. ($\rho = 0,53$) • Tamaño de los círculos: 17, 7 y 1,9 mm de diámetro, a 40 cm; unos 2,4°, 1° y 0,27°) • Tamaño de las líneas: 3,5, 1,9 y 1 mm de ancho, a 40 cm; unos 0,5°, 0,27° y 0,14°; y 20 mm de largo, unos 2,9°) • Presentación binocular, simultánea, contrabalanceando los efectos de la forma (intrasujeto) • Tiempo de exposición: 2 s (a juicio del experimentador) 	<ul style="list-style-type: none"> • Estudiar cuantitativamente la relación entre el tamaño (y la forma) de la estimulación y la probabilidad de error en una tarea de denominación en diferentes tipos de daltónicos
Bonnardel (2006)	140 (Munsell) Clasificación en categorías, libre y restringida Denominación monolexémica restringida a las 8 CCB cromáticas (denominación)	5 DAE (4 H y 1 M) 6 x 1 Edad: adultos jóvenes excepto dos D, de mediana edad TN Estudiantes [140 x 44 = 6160]	<ul style="list-style-type: none"> • Ilum.: D65 • Fondo: acr. ($\rho = 0,2$; $L_v = 150$ cd/m²) • Tamaño: sin control riguroso de la distancia • Presentación binocular, secuencial y aleatoria (simultánea en las tareas de clasificación) • Tiempo de exposición: ilimitado 	<ul style="list-style-type: none"> • Comparación del comportamiento de los observadores daltónicos con el de los tricrómatas normales en las diferentes tareas • Aplicación del MDS

Como se ha comentado anteriormente, existe una obvia discrepancia entre el uso que cabría esperar de los términos de color por parte de observadores dicrómatas a partir de la aplicación estricta de la teoría de los procesos oponentes, y el uso empírico que de hecho se da. Jameson y Hurvich (1978) realizaron el siguiente experimento: empleando la misma muestra de estímulos, los 16 que conforman el test D15, pidieron a observadores dicrómatas que realizaran las dos tareas siguientes: 1) que ordenaran los estímulos en función de su parecido (es decir, que llevaran a cabo la tarea de ordenación de tonos como indica la aplicación estándar del test), y 2) que nombraran los estímulos, presentados en una segunda sesión en el mismo orden en el que previamente los habían ordenado.

A partir de las funciones de valencia cromática que los propios autores determinaron experimentalmente para cuantificar la teoría de los procesos oponentes (véase el apartado 1.4.1.1, la Figura 4.1 y la ecuación (29)), y las funciones de radiancia espectral de los 16 estímulos del D-15 (consúltese Hurvich, 1981, capítulo 7), los autores computaron la magnitud de respuesta de los mecanismo *rojo-verde* y *azul-amarillo* para cada estímulo. Para simular la respuesta perceptiva de los dicrómatas, eliminaron la respuesta del mecanismo *rojo-verde*, de manera que la única dimensión útil para discriminar los estímulos fuese la magnitud de respuesta del mecanismo *azul-amarillo* (según Hurvich y Jameson, 1955, p. 611, las curva de respuesta cromática *azul-amarillo* para deuteranopes es idéntica a la de observadores tricrómatas normales, y para protanopes está ligeramente desplazada hacia longitudes de onda corta).

Los resultados indicaron que, a pesar del comportamiento dicrómata observado en la tarea de ordenación de tonos, un observador deuteranope (de los 3 incluidos en el experimento) y dos protanopes (de un total de 3), realizaron un buen uso de los términos de color, esto es, acorde al que realizó el observador tricrómata normal que sirvió de control. Mientras que los resultados de la tarea de ordenación de tonos estaban en plena sintonía con las distancias perceptivas computadas, la “corrección” en la denominación de color era absolutamente impredecible (únicamente se predeciría el uso de los términos *amarillo*, *azul*, o *acromático*, o como mucho, un uso totalmente aleatorio de otros términos que informan sobre la activación relativa del mecanismo rojo-verde).

Los autores explicaron los resultados obtenidos de la siguiente manera. Mientras que, en la tarea de ordenación de tonos, los dicrómatas utilizarían exclusivamente información relativa al color de los estímulos, en la tarea de denominación emplearían *además* otro tipo de información, de manera que les fuese posible denominar de forma *diferente* estímulos que perceptivamente son muy similares para ellos, de tal suerte que su denominación se asemeje a la de los observadores con visión normal del color. ¿Qué tipo de información podría ser de utilidad? En los observadores dicrómatas, no está alterada únicamente la percepción del color, sino también (sobre todo en los protanopes) la percepción de la claridad (véase la Tabla 3.2 y la Figura 3.3). Esta alteración puede aportar pistas a la hora de enfrentarse en la (cotidiana) tarea de denominación de color, de manera que, por ejemplo, ante estímulos que acumulan energía en la parte larga del

espectro, y que por tanto son percibidos como más oscuros por observadores protanopes, estos tenderán a emplear la CCB *rojo*, en lugar de *verde*.

Con el paso del tiempo, este tipo de explicación ha venido a convertirse en una de las hipótesis más robustas cuando se trata de dar cuenta del comportamiento que exhiben los observadores dicrómatas en tareas de denominación de color, y que resulta ser bastante menos errático de lo esperable. Nótese que este tipo de explicación no tiene para nada en cuenta la posible existencia de un cierto grado de discriminación residual *rojo-verde* en observadores dicrómatas, y que por lo tanto, es incapaz de explicar resultados como los obtenidos por Scheibner y Boynton (1968) o en cualquier otra investigación en la que se hayan presentado estímulos *igualados en brillo* (no en luminancia estándar) ante los cuales se haya registrado un uso diferencial del término *rojo* en función de la longitud de onda.

Como reflexión final, Jameson y Hurvich (1978, p. 154) argumentaron que los resultados obtenidos resultaban estar en contra de la famosa hipótesis (relativista) de Whorf (el lenguaje “determina” la percepción), puesto que a pesar de usar nombres diferentes ante los estímulos del test D-15, esto no mejoraba la discriminación del color, como ponían de manifiesto los resultados de la tarea de ordenación de tonos.

Montag y Boynton (1987) estudiaron la denominación de color en observadores daltónicos dicrómatas ante estímulos de superficie, esperando que esta 1) fuese inconsistente, 2) no incluyese las 11 CCB propias de los tricrómatas, y 3) reflejase una discriminación reducida a dos dimensiones (claridad y eje *azul-amarillo*). En el Experimento 1 (bajo condiciones estándar de observación) replicaron el estudio realizado por Boynton y Olson (1987), encontrando los siguientes resultados:

1. *Frecuencia de uso.* Las CCB fueron empleadas con mayor frecuencia que las CCNB, y 4 de los 6 observadores emplearon las 11 CCB (las excepciones provinieron de un observador con visión normal del color y un deuteranope). En el caso de los dicrómatas, esta diferencia fue mucho más pronunciada: el uso de CCNB por parte de observadores dicrómatas fue prácticamente inexistente.
2. *Consistencia.* Las CCB se emplearon de forma más consistente que las CCNB, tanto en tricrómatas normales como en dicrómatas. Las únicas excepciones de

uso consistente provinieron las CCB *naranja* (1 observador), *gris* (2 observadores) y *negro* (3 observadores).

3. *Tiempos de reacción*. Tal y como ocurrió en Boynton y Olson (1987), el TR fue menor para las CCB para todos los sujetos, tanto normales como dicrómatas (y no hubo diferencias en esta variable entre ambos grupos de observadores).

Montag y Boynton (1987) no ofrecieron ningún tipo de análisis sobre las variables de consenso ni sobre los colores focales (presumiblemente, aunque los autores no mencionan ninguna justificación, porque no existió un consenso de 100%, como reconocería el propio Montag en su trabajo de 1994). Respecto a la localización de las CCB en el espacio de color OSA, Montag y Boynton (1987), empleando la métrica propia del atlas OSA (y por tanto válida únicamente para tricrómatas normales), encontraron los siguientes resultados:

1. *Centroides*. A pesar de que los dicrómatas mostraron un uso más idiosincrásico de las CCB, la localización de los centroides de dichas categorías fue más parecida a la de los tricrómatas de lo que cabría esperar a partir de la hipótesis de la reducción. Concretamente:
 - a. *Dimensión L*. Los datos confirmaron que el uso de las CCB depende del nivel de claridad (Boynton y Olson, 1987), extendiendo dicho resultado a observadores dicrómatas.
 - b. *Plano j, g*. Se observó que los centroides de las CCB, a pesar de estar menos alejados que los de los tricrómatas normales, no estaban alineados en torno a una línea de discriminación *azul-amarillo*, lo cual reflejaba cierto grado de discriminación residual en el eje *rojo-verde*.
2. *Análisis de las conexiones*.
 - a. Todas las conexiones que se dieron entre CCB en observadores tricrómatas normales se dieron también en observadores dicrómatas.
 - b. Además, existieron conexiones entre CCB en observadores dicrómatas que no se dieron en tricrómatas normales, tres de las cuales ocurrieron para todos los dicrómatas: *verde-naranja*, *verde-marrón*, y *azul-rosa*.

En un intento de establecer qué mecanismo podría ser el responsable de la discriminación residual que mostraron los dicrómatas en el Experimento 1, los autores

realizaron dos experimentos más, en los que modificaron las condiciones de observación para impedir que los bastones influyeran en los resultados. En el Experimento 2 evitaron que los estímulos se proyectaron sobre zonas de la retina en las que hay bastones (reduciendo el tamaño de los estímulos a 1° y el tiempo de exposición a 50 ms, consúltese Wyszecki y Stiles, 1982), y en el Experimento 3 replicaron el Experimento 1 pero durante la fase de saturación de los bastones, en la que únicamente los conos están operativos. En ambos experimentos el resultado fue el mismo: la localización de los centroides en el plano cromático *j, g* sufrió cambios importantes que no se dieron para los observadores normales: los centroides migraron hacia la línea que une el eje *amarillo-azul*. Los autores concluyeron que los bastones eran los responsables de la existencia de discriminación residual en el eje *rojo-verde*.

Sin embargo Montag (1994) encontró evidencia en contra de esta conclusión, puesto que, respecto a una condición estándar con estímulos de 4° de ángulo visual presentados durante 5 s, los observadores dicrómatas de su investigación mostraron una reducción en la discriminación cromática (migración de los centroides) al reducir el tiempo de presentación a 50 ms, independientemente de si el tamaño se reducía a 1° (lo cual elimina la posible participación de los bastones) o se mantenía en 4° (permitiendo por tanto la participación de los bastones). En un segundo experimento (Experimento 2), en el que (manteniendo constante un tamaño de 4° y un tiempo de presentación de 5 s) se manipuló el nivel de iluminación, se observó que este no produjo un deterioro en la respuesta de los dicrómatas, a pesar de que el nivel de iluminación más alto era lo bastante elevado como para impedir una respuesta diferencial de los bastones ante los estímulos presentados. Por último, en el Experimento 3 (manteniendo constante un tamaño de 4°) se manipuló tanto el nivel de iluminación como el tiempo de presentación, y se constató que durante la fase de saturación de los bastones no se produjo deterioro alguno en la respuesta de los dicrómatas. Montag (1994) concluyó que el mecanismo responsable de la relativamente buena categorización de los dicrómatas no eran por lo tanto los bastones, sino un tercer tipo de cono anómalo residual.

Basándose en los hallazgos encontrados por Montag y Boynton (1987) y Montag (1994), el equipo de investigación dirigido por Julio Lillo realizó dos investigaciones encaminadas a estudiar el uso de CCB en niños daltónicos dicrómatas. En la primera de

ellas (Lillo, Davies et al., 2001) se emplearon como estímulos los prototipos de las 11 CCB, y se comparó el comportamiento exhibido por los niños daltónicos con el que cabría esperar a partir de la aplicación de un modelo de predicción de errores de denominación en dicrómatas.

La clave para hacer este tipo de predicciones radica en la incorporación de la información relativa a la localización de las CCB en un diagrama de cromaticidad estándar (véase el apartado 1.3.1.3). Según dicho modelo (consúltase el apéndice de Lillo, Davies et al., 2001), para un estímulo concreto y un tipo de dicrómata, se predice el uso de una CCB si se cumplen las *dos* condiciones siguientes:

- 1) la *línea de confusión* definida por las coordenadas cromáticas de dicho estímulo y las del punto de confusión correspondiente al dicromatismo de que se trate, pasa por la región que ocupa la CCB considerada en el diagrama de cromaticidad, y
- 2) el *factor de luminancia* del estímulo (*transformado* de acuerdo a las características de la sensibilidad espectral del tipo de dicrómata) cae dentro del rango de valores propio de la CCB considerada en esta dimensión fotométrica (recuérdese que el uso de las CCB depende del nivel de claridad, dimensión perceptiva que depende del factor de luminancia).

Nótese que en este modelo, derivado de la aplicación lógica de las características psicofísicas del dicromatismo al problema de la categorización del color, se excluye cualquier atisbo de discriminación residual “rojo-verde”. Los resultados más importantes que se encontraron en el trabajo citado se describen a continuación:

1. El modelo descrito **sobreestimó el número de errores** que de hecho cometieron los dicrómatas. Frente al 33% y al 42% de respuestas correctas predichas para protanopes y deuteranopes, respectivamente, se obtuvo un 73% y un 78% de aciertos. La Figura 4.3 resume los resultados encontrados, poniendo de manifiesto un comportamiento mucho más acertado para las CCB cromáticas primarias, *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul*, frente a las secundarias *rosa*, *naranja*, *morado*, y *marrón*. Respecto a las CCB acromáticas, *blanco* fue la que obtuvo un mejor resultado, seguida de *negro* y de *gris* (que resultó ser la peor de todas).

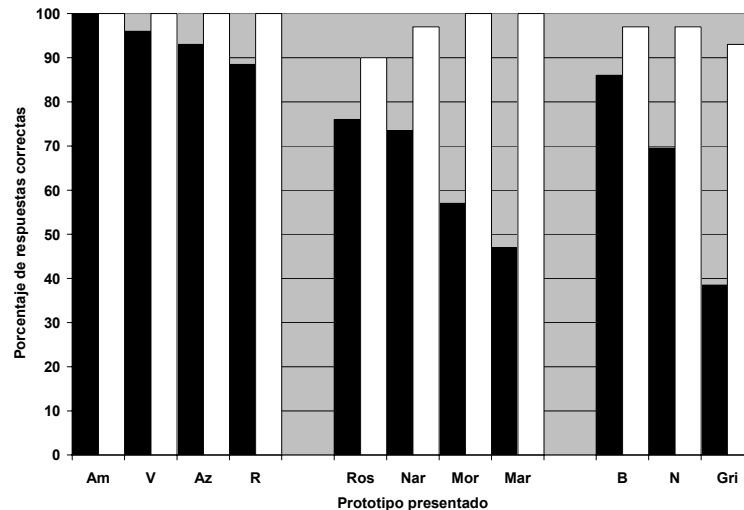


Figura 4.3. Porcentaje de aciertos en la denominación de estímulos prototípicos de las CCB. Barras blancas: niños controles, barras negras: niños daltónicos dicrómatas. A partir de Lillo y Moreira (2004a, Figura 5).

- Además, el modelo **no predijo bien la distribución del número de errores por categoría**: el coeficiente de correlación entre el número de errores predicho y el obtenido empíricamente fue de 0,42 para los protanopes y de 0,43 para los deuteranopes.
- Aunque a nivel cuantitativo se predijo un mayor número de errores, a nivel cualitativo, el modelo fue capaz de predecir **adecuadamente qué tipo de errores** eran los más frecuentes: por encima del 80% de los errores estaban incluidos en las CCB predichas.

Los principales inconvenientes de esta investigación son los siguientes:

- En el modelo descrito, la predicción del *número* de errores y de respuestas correctas es de carácter **equiprobabilístico**. Esto quiere decir que para un estímulo y un tipo de dicrómata concretos, si se predice el uso de x CCBs, la probabilidad predicha para cada una de las CCB será exactamente igual a $1/x$. Por ejemplo, si para el prototipo de *rojo* se predicen las categorías de *rojo*, *verde*, *naranja* y *marrón*, se espera un 25% de aciertos y un 75% de errores en la tarea de denominación cuando se presente este estímulo.

2. Los volúmenes colorimétricos de las CCB fueron tomados de la investigación de Boynton y Olson (1987), debido a la ausencia de datos científicos sobre las CCB del español.
3. Únicamente se estudió la denominación de color ante una muestra estimular de características muy peculiares: los prototipos de las 11CCB.

Lillo, Vitini et al. (2001), contrastaron la adecuación de las predicciones de dos modelos alternativos de predicción de errores de denominación en daltónicos dicrómatas: El *Modelo 1*, idéntico al descrito en la investigación anterior, y el *Modelo 2*, ideado para incluir el efecto de cierta discriminación residual rojo-verde (proveniente de un tercer tipo de cono escasamente representado en la periferia de la retina, tal y como propusiera Montag, 1994). Si bien el *Modelo 2* predice cualitativamente los mismos tipos de error que el *Modelo 1*, ya que se basa en el mismo procedimiento para determinar las CCBs esperables ante un estímulo y un tipo de dicrómata, bajo las predicciones del *Modelo 2* cabe esperar un menor número de errores, concretamente para aquellos estímulos de menor saturación (CIE). Los resultados principales obtenidos se resumen a continuación:

1. Al igual que en la investigación previa (Lillo, Davies et al., 2001), el *Modelo 1* predijo adecuadamente qué tipo de errores serían los más frecuentes, pero sobreestimó su número.
2. Los protanopes, en general, cometieron más errores de denominación que los deuteranopes.
3. Los errores se redujeron significativamente con la saturación (CIE).

Parece pues claro que las predicciones cuantitativas mejoran al incluir cierta discriminación residual en el modelo. No obstante, esta investigación, además de compartir algunos inconvenientes de la investigación previa (concretamente la equiprobabilidad incluida en el modelo empleado, y el uso de los volúmenes colorimétricos obtenidos por Boynton y Olson, 1987), presenta las siguientes limitaciones:

1. Los resultados no pueden extrapolarse directamente al total de las 11 CCB, ya que sólo se emplearon 12 muestras de color, que representaban únicamente las CCB *verde, azul y morado*.
2. No se estudió de forma sistemática en qué grado se reducía el número de errores en función del tamaño estimular, tal y como reconocieron los propios autores: *“Sin embargo, se necesita más investigación antes de poder establecer una relación más cuantitativa entre el tamaño estimular y la precisión en la respuesta”* (p. 35).

Recientemente, Cole et al. (2006) llevaron a cabo una investigación para estudiar precisamente este tipo de relación. Manipularon experimentalmente la forma y el tamaño de los estímulos presentados (círculos de unos 2,4°, 1° y 0,27° y líneas de 0,5°, 0,27° y 0,14° de ancho y 2,9° de largo) en una tarea de denominación. Los resultados más importantes que encontraron se describen a continuación:

1. La comparación entre el número de errores cometido por los diferentes grupos de daltónicos (aglutinando los resultados a través de todas las condiciones experimentales) mostró el siguiente patrón:
 - a. En cuanto al *número de errores* cometidos, los deuteranómalos leves fueron los que menos errores tuvieron (0,7%; se encontraron diferencias significativas con el resto de los grupos), seguidos de los protanómalos leves (2,6%), que tuvieron un mejor desempeño que los dicrómatas (protanopes: 11%, deuteranopes, 9,4%), pero no que los protanómalos moderados (7,2%). No se encontraron diferencias significativas entre protanopes y deuteranopes.
 - b. El número de deuteranómalos leves que no cometió ningún error (70%) fue mayor que el de protanómalos leves (27%), existiendo diferencias significativas entre ambos grupos, y entre su combinación y el resto de daltónicos, sólo un 5% de los cuales no cometió ningún error. Entre los dicrómatas, no hubo ninguno que no cometiera errores (aunque un 20% cometió menos del 5% de errores).
2. El *tamaño* mostró un efecto significativo sobre la probabilidad de error, mostrando una relación inversa (de manera que al aumentar el tamaño de la estimulación, la probabilidad de error disminuyó). Concretamente, los autores

optaron por describir cuantitativamente dicha relación expresando la probabilidad de error en función de $1/a$, siendo a el área (en mm^2) del estímulo. Este tipo de ajuste implica que la probabilidad asintótica de error (la probabilidad mínima de error, asociada a estímulos muy grandes) tiende a un límite mayor que 0. Comparando los diferentes *tipos de daltonismo* en este parámetro, los autores no encontraron diferencias significativas entre protanopes y deuteranopes (0,061 para ambos grupos), tampoco entre deuteranómalos moderados (0,027) y protanómalos moderados (0,034), ni entre estos últimos y dicrómatas. Pero sí existieron diferencias significativas para el resto de comparaciones: los deuteranómalos leves mostraron la menor probabilidad asintótica de error (0,002), seguidos de los protanómalos leves (0,012). Por último, también existieron diferencias significativas entre los deuteranómalos moderados y los dicrómatas.

3. Por otra parte, la *forma* (círculos vs. líneas) no mostró efectos significativos, encontrándose sin embargo interacciones significativas, que se describen a continuación. La tasa a la que disminuyó la probabilidad de error conforme aumentaba el tamaño difirió según:
 - a. El *tipo de daltonismo*, de manera que la disminución es más pronunciada para los daltonismos más leves que para los más severos (aunque estas diferencias tendían a desaparecer para estímulos grandes).
 - b. La forma del estímulo, de suerte que la disminución es más pronunciada para los círculos que para las líneas (aunque estas diferencias tendían a desaparecer para estímulos grandes).
4. Respecto al *tipo de errores* y la *frecuencia* con que se cometieron en función de las *diferentes CCB*, *amarillo* recibió un 100% de respuestas correctas, mientras que *blanco* y *negro* apenas recibieron respuestas incorrectas. Por tanto, los errores se acumularon en los estímulos que representaban las siguientes categorías (nos centraremos únicamente en los daltónicos que presentaron más errores, los anómalos moderados y los dicrómatas, especificando la distribución de los errores entre categorías. No se ofrecen datos exactos porque la información ha sido leída directamente de las Figuras 7 y 8 del artículo original):
 - a. *Marrón*. En torno al 31% de las respuestas ante el estímulo que representaba esta CCB fueron erróneas. La distribución de los errores entre las diferentes categorías fue: *rojo* (26% de los errores de

- observadores con defectos tipo protán; 15% de los errores de observadores con defectos deután), *verde* (8%; 11%), *naranja* (3%; 1%).
- b. *Rojo*. En torno al 15% de errores, distribuidos entre *marrón* (13%; 14%), *verde* (2%; 1%), y *morado* (1%; 0%).
 - c. *Naranja*. En torno al 13% de errores, distribuidos entre *verde* (15%; 4%), *marrón* (6%; 2%), *rojo* (4%; 1%) y *gris* (2%; 0%).
 - d. *Verde*. En torno al 12% de errores, distribuidos entre *naranja* (7%; 3%), *rojo* (1%; 5%), y *marrón* (1%; 5%).
 - e. *Morado*. En torno al 5% de errores, distribuidos entre *azul* (8%; 1%), y *gris* (3%; 1%).
 - f. *Azul*. En torno al 3% de errores, todos por denominarlo *morado* (7%; 1%).
 - g. *Gris*. En torno al 2-3% de errores, todos por denominarlo *morado* (7%; 1%).

Como reconocieron los propios autores, esta investigación presenta los siguientes inconvenientes:

1. No se incluyó la CCB *rosa*. Además, el criterio de selección de los estímulos elegidos para representar las 10 CCB estudiadas se basó en el juicio de los investigadores (p. 881). Esto puede afectar a la generalizabilidad de los resultados encontrados. A modo de ejemplo, los propios autores (p. 885) proponen un posible factor que puede explicar en parte por qué los protanómalos leves cometieron más errores que los deuteranómalos leves: los estímulos elegidos para representar las CCB *naranja*, *marrón* y *verde*, caen muy cerca de una misma línea de confusión protanope, siendo por tanto más fácilmente distinguibles para observadores con defectos de tipo deután (lo mismo ocurrió con los estímulos seleccionados para representar las CCB *azul* y *morado*).
2. A pesar de que se ofrece información muy útil sobre la relación cuantitativa existente entre el tamaño de los estímulos y la probabilidad de error, dicha información *no se matiza en función de las diferentes CCB* (por ejemplo, no tiene sentido aplicar tal relación a *amarillo*, puesto que no recibió ninguna denominación incorrecta). Esto puede llevar a graves errores de interpretación de los resultados, puesto que se podría pensar que dado que la probabilidad

asintótica de error encontrada para dicrómatas fue de 0,061, se podría reducir a un 6% los errores cometidos ante la CCB *marrón* simplemente presentando muestras lo bastante grandes.

3. El algoritmo empleado para simular la visión del color en dicrómatas no parece totalmente adecuado, ya que en la Figura 1B, donde se muestra la simulación de la apariencia del color de un deuteranope para los 10 estímulos empleados, se dan alteraciones en la reflectancia transformada (por ejemplo, las muestras rojizas aparecen aún más oscuras en la simulación, lo cual sólo sería cierto para protanopes). Este detalle no tendría más trascendencia si los autores no se hubieran servido de esta simulación para ilustrar su idea de que el reducido número de errores cometidos se debe fundamentalmente a que de hecho existen pequeñas diferencias perceptivas entre los 10 estímulos presentados.

Otro estudio reciente es el de Bonnardel (2006). Esta autora estudió la categorización de estímulos de color en observadores con deficiencias de tipo deután, y la comparó con la de tricrómatas normales, empleando un total de 140 estímulos y tres tareas diferentes: clasificación de los estímulos en un número no limitado de categorías, clasificación en las 8 CCB cromáticas, y denominación restringida de color empleando las mismas 8 CCB cromáticas. Los resultados más destacados de esta investigación se describen a continuación:

1. En la tarea de denominación de color, el **grado de similitud** (porcentaje de muestras que recibieron el mismo nombre) entre los mapas de colores fue menor para los observadores deuteranopes o deuteranómalos extremos (66%-72%) que para los deuteranómalos leves (79-85%). Así mismo, los primeros emplearon con mayor frecuencia las categorías de *rosa* y *verde*, y menos las de *azul* y *morado*. La frontera entre las categorías de *azul* y *verde* se desplazó con respecto a su localización en tricrómatas normales, de manera que se situó hacia muestras más azuladas.
2. El **análisis del consenso** (coincidencias entre observadores, operativizado como la raíz de la correlación media de un conjunto de correlaciones), reveló que los observadores con defectos deután mostraron un consenso algo menor (58,8%) que los tricrómatas normales (62,2%; el consenso global fue de 59,9%). Este mismo resultado se obtuvo analizando el consenso por separado en cada una de

las tres tareas, análisis que puso de manifiesto que el consenso aumentaba a medida que se imponían restricciones en las tareas (clasificación libre, restringida y denominación de color). Por último, un análisis individual del consenso a través de las tres tareas, permitió constatar que el consenso intraindividual era mayor que el interindividual, aunque esta diferencia, muy obvia en los observadores con defectos deuterán, era residual en tricrómatas normales. El resultado se interpretó como una prueba de que cada observador tendía a emplear una estrategia común al realizar las diferentes tareas.

3. La técnica de **MDS**, aplicada a los datos agrupados provenientes de las tres tareas, reveló la existencia de **tres dimensiones**. Las dos primeras fueron etiquetadas por la autora como *rojizo-verdoso*, y *amarillento-azulado*. La tercera dimensión fue etiquetada como *claridad* en el caso de los tricrómatas normales, mientras que para los observadores con defectos deuterán no pudo ser identificada. Un análisis de escalamiento multidimensional de diferencias individuales (**INDSCAL**, que a partir de la construcción de un espacio común permite cuantificar las diferencias individuales en función del peso que cada observador otorga a las diferentes dimensiones), realizado a partir de los datos derivados de cada una de las tareas, demostró que no existieron diferencias en las tareas de clasificación, pero sí en la tarea de denominación de color, de tal manera que la dimensión *azul-amarillenta* de los deuteranes mostró una sorprendente compresión respecto a los tricrómatas normales, mientras que no hubo diferencias significativas en la dimensión *rojizo-verdoso*. Este resultado se interpretó como una consecuencia obvia de la mayor frecuencia de uso de las categorías *rosa* y *verde* (en detrimento de las de *azul* y *morado*). También hubo diferencias significativas en la dimensión “*claridad*”, que mostró una expansión en los deuteranes.

La autora atribuyó los resultados a la importancia de factores de aprendizaje, así como al efecto normativo del lenguaje, concluyendo que tal vez, en las tareas empleadas, no se pone de manifiesto realmente la representación perceptiva de los colores en observadores con alteraciones en la visión del color (una conclusión muy en la línea de la que casi treinta años antes habían enunciado Jameson y Hurvich, 1978, como ya se comentó anteriormente). Algunos inconvenientes presentes en esta investigación serían los siguientes:

1. Únicamente se estudió el uso de las 8 CCB cromáticas, dejando fuera de la investigación el estudio de *blanco*, *negro* y *gris*.
2. Únicamente se emplearon los estímulos de *máximo croma* para cada uno de los tonos representados.
3. La comparación de los resultados obtenidos en la tarea de denominación de color entre los observadores deuteranos y el grupo de tricrómatas normales se basó en el “mapa prototípico” de estos últimos. Esto es, los resultados de la denominación de color en tricrómatas normales se resumieron empleando la moda (la CCB empleada más frecuentemente para cada muestra). Por lo tanto no se tuvo en cuenta el hecho de que la pertenencia de una muestra de color a una CCB es una cuestión de *grado*, no de todo-nada. Esto puede desvirtuar en parte los resultados relativos al cómputo del grado de similitud.
4. Salvo comentarios aislados, el trabajo ofrece muy poca información sobre la naturaleza de las *confusiones* acaecidas.
5. A pesar de existir observadores con déficit deuterano tanto *grave* como *leve* en la muestra, en diferentes análisis (como por ejemplo en los efectuados sobre el nivel de consenso) se *agruparon* sus resultados, obviando este hecho.

1.4.2.2. DENOMINACIÓN DEL COLOR EN OBSERVADORES DE EDAD AVANZADA

En el apartado 1.2.7 se expuso la influencia que el filtrado prerretinano tiene sobre las funciones de igualación del color, y en el 1.3.2.2 se han detallado diferentes investigaciones relacionadas con la influencia de la edad sobre diversos aspectos relativos a la percepción del color, atendiendo especialmente al aumento de la densidad del cristalino asociado a la edad.

La más que evidente disociación entre dos hechos, 1) el deterioro fisiológico que sufre el sistema visual por un lado, y 2) la aparente constancia del color a lo largo del ciclo vital por otro, conduce necesariamente a pensar que el sistema visual efectúa una compensación de los cambios fisiológicos, minimizando sus efectos perceptivos.

En el terreno de las CCB, nos centreamos en dos posturas opuestas. Por un lado, en trabajos como el de Lindsay y Brown (2002), se efectúan simulaciones del envejecimiento con el objeto de acreditar la inexorable influencia que el filtrado extra del cristalino envejecido tiene sobre la categorización del color. Lindsay y Brown (2002) intentaron dar apoyo a las tesis universalistas sobre la categorización del color¹⁰, argumentando que el término *grue* (categoría compuesta de *verde* y *azul*: apartado 1.4.1.2) podría derivarse del hecho de que las culturas que lo utilizan están expuestas a una mayor cantidad de radiación UV, lo que aceleraría el proceso de foto-oxidación del cristalino, y por tanto su progresivo amarillamiento.

En el otro extremo, trabajos como el de Hardy, Frederick, Kay y Werner (2005; consúltese también Scheffrin y Werner, 1993) ponen de manifiesto que, en realidad, los observadores de edad avanzada no categorizan el color como cabría esperar a partir de un cristalino envejecido que absorbe selectivamente longitudes de onda corta. En este trabajo, en el que sí participaron observadores reales, se concluyó, como en otros tantos trabajos comentados en el apartado 1.3.2.2, que de alguna manera el sistema visual ha de compensar (al menos parcialmente) los efectos del progresivo amarillamiento del cristalino a favor de mantener la constancia del color a lo largo del ciclo vital.

¹⁰ De manera bastante desafortunada, según alguien como Paul Kay, nada sospechoso de relativismo: Regier y Kay (2002).

***Uso de Términos de Color
Básicos en Daltónicos Dicromatas
y Personas de Edad Avanzada***

PARTE EMPÍRICA

2.1. CAPÍTULO 5: INTRODUCCIÓN A LOS ESTUDIOS EMPÍRICOS

Tal y como se ha comentado en la introducción de esta tesis y en el apartado 1.4.1.2, durante el periodo comprendido entre los años 1995-2007, el equipo de investigación de la Facultad de Psicología de la Universidad Complutense de Madrid, dirigido por J. Lillo, del que desde el año 1999 forma parte el autor de la presente tesis, desarrolló una línea de investigación encaminada a: 1) identificar las CCB del español, 2) localizarlas en un espacio de color estandarizado (CIELUV), y 3) compararlas con las CCB del inglés (Vitini, 2002; Lillo y Moreira, 2004c; Lillo, Aguado, Moreira y Davies, 2004; Lillo et al., 2007).

Los resultados obtenidos hasta la fecha en dichas investigaciones suponen el punto de partida de esta tesis, cuyo **objetivo principal** es estudiar el uso de las CCB en tres tipos de personas con alteraciones en la percepción del color: protanopes, deuteranopes y personas mayores con defectos tritán¹. El conocimiento pormenorizado de dicho uso tiene una importancia innegable, tanto desde un punto de vista puramente teórico como desde un punto de vista plenamente aplicado.

Desde una perspectiva teórica, ya ha quedado suficientemente claro en los apartados 1.4.2.1 y 1.4.2.2 que existen importantes lagunas y restricciones que impiden articular directamente los conocimientos que se tienen sobre diferentes alteraciones de la percepción del color a nivel genético, fisiológico y/o psicofísico, con el comportamiento exhibido por las personas que sufren dichas alteraciones en cuanto al manejo de las CCB se refiere. En este contexto, es de vital importancia recabar datos, obtenidos en condiciones de observación controladas, sobre cómo emplean todas y cada una de las CCB diferentes personas con diferentes tipos de alteraciones. Sólo de esta manera pueden, bien postularse a partir de datos empíricos, o bien ponerse a prueba, modelos que intenten explicar y predecir el uso de las CCB en este tipo de observadores.

¹ Utilizaremos preferentemente la expresión “*defectos tritán*” en lugar del controvertido término “*tritanómalo*”, con el objeto de evitar posibles confusiones relativas a este último, que como ya se comentó en el apartado 1.3.1.1, es cuestionado por diferentes autores expertos en el tema de las deficiencias de la visión del color (Pokorny y Smith 1986; Smith y Pokorny, 2003; Sharpe et al., 1999).

Así mismo, las implicaciones de carácter aplicado derivadas de conocer cómo emplean las CCB este tipo de observadores, son evidentes, y afectan a todas aquellas personas que interaccionan de forma cotidiana con material de tipo cromático, trátase de diseñadores, evaluadores o usuarios de esta clase de material.

Protanopes y deuteranopes son los dos tipos de dicrómatas más frecuentes, y se incluyen dentro de los daltonismos comunes (consúltese la Tabla 3.3). Como ya se ha descrito con detalle en los apartados 1.3.1.1 y 1.3.1.2, se conocen con bastante exactitud diferentes aspectos de estas discromatopsias, como son: 1) su origen *genético* (se trata de alteraciones ligadas al cromosoma X que se heredan como rasgos recesivos), 2) la carencia *fisiológica* asociada a nivel de fotorreceptores (se posee un único tipo de fotopigmento además del S y la rodopsina), y 3) diversas características *psicofísicas*, como la sensibilidad espectral, la existencia de una zona neutral en el espectro visible, o la severa disminución en la capacidad de discriminación cromática que sufre este tipo de observadores (véase la Tabla 3.2).

Es más, a partir de las coordenadas cromáticas de un estímulo concreto, se pueden establecer las coordenadas de los estímulos que en principio son indistinguibles de aquél (basta con trazar una línea de confusión definida por las coordenadas cromáticas del estímulo de interés y las del punto de confusión correspondiente al tipo de dicrómata de que se trate, como se expuso en el apartado 1.3.1.3). Incluso, como se ilustró en el apartado 1.3.1.4, existen modelos de simulación de la apariencia del color para este tipo de observadores, que permiten, a partir de determinados supuestos, transformar colorimétricamente cualquier escena de manera que un observador con visión normal del color pueda experimentar los mismos colores que un dicrómata.

Sin embargo, no existen conocimientos sistemáticos respecto al uso de las CCB en este tipo de personas, ni mucho menos un modelo explícito que permita articular dicho comportamiento con los conocimientos mencionados. Comentaremos estos dos puntos a continuación.

En las investigaciones realizadas con **estímulos monocromáticos** (resumidos en la Tabla 4.8), por lo general, a los observadores únicamente se les permitió emplear los términos *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul*. En los experimentos de Paramei, así como en el

de Wachtler, Dohrmann y Hertel (2004), se incluyó el término *blanco*, y Nagy y Boynton (1979) eliminaron el término *azul* y permitieron el uso de *naranja* para estudiar el rango espectral comprendido entre 530 y 650 nm. Esto deja fuera de estudio las CCB *negro*, *marrón*, *rosa* y *gris*, además de *morado*. Como resulta evidente, los resultados obtenidos en este tipo de investigaciones no son suficientes ni directamente extrapolables al uso del total de 11 CCB. En el mejor de los casos, los resultados de estas investigaciones ofrecen importantes claves a tener en cuenta a la hora de afrontar el estudio de la denominación del color de protanopes y deuteranopes, como que estos observadores emplean de hecho los términos *rojo* y *verde*, que su denominación muestra una fuerte dependencia de la luminancia, y que parece existir cierta discriminación residual rojo-verde (como demuestra el aumento en la frecuencia de uso de *rojo* a medida que aumenta la longitud de onda de estímulos monocromáticos, tanto isoluminantes como igualados en brillo, presentados en el rango 530-700 nm).

Por lo tanto, si se quiere ahondar en el estudio de cómo utilizan las CCB los daltónicos dicrómatas, las investigaciones realizadas hasta la fecha empleando **estímulos de superficie** se muestran mucho más sintonizadas que las que han empleado estímulos monocromáticos. Aun así, estas investigaciones tampoco han derivado en un conocimiento sistemático. Las razones fundamentales que sustentan esta afirmación derivan de las propias características de las investigaciones efectuadas, pudiendo distinguirse los siguientes aspectos clave:

A. Muestreo de los estímulos utilizados. Cuando se emplean estímulos monocromáticos, la decisión básica que se debe tomar a la hora de muestrear el espectro visible se refiere fundamentalmente al rango de longitudes de onda que se quiere estudiar y a la separación ($\Delta\lambda$) entre los diferentes estímulos empleados. El proceso de muestreo es bastante más complicado cuando se trata de estímulos de superficie. Habida cuenta de la dificultad y la necesaria arbitrariedad que supone realizar un muestreo adecuado de estímulos de superficie para el estudio de las CCB, pueden ocurrir carencias importantes en esta fase vital de la investigación:

- *Mala representación de las CCB acromáticas.* Algunas investigaciones ni siquiera incluyen estímulos acromáticos (como ocurre en Jameson y Hurvich, 1978; Lillo, Davies et al., 2001; Lillo, Vitini et al., 2001, Cole et al., 2006, o Bonnardel, 2006). Y en otras investigaciones que sí lo

hacen, el muestreo realizado dista de ser adecuado. Los trabajos de Montag y Boynton (1987) y Montag (1994) suponen un claro ejemplo, al trabajar con estímulos provenientes del atlas OSA (recuérdese que, tal y como ya fue detallado en el apartado 1.4.2.1, los propios Boynton y Olson, 1987, reconocieron que en los estímulos empleados no se representaban bien las CCB acromáticas, al igual que ocurría con *rojo*). Las consecuencias de esta mala representación son patentes en las dos investigaciones citadas. Montag y Boynton (1987, p. 2154) informaron de que la CCB *gris* mostró falta de consistencia en 2 observadores, y la CCB *negro* en 3, del total de 6 participantes. En Montag (1994), puede observarse la ausencia de la CCB *negro* en algunas de las representaciones de los centroides de la Figura 3. Por último, la selección de estímulos realizada por Cole et al. (2006), donde sí se incluyen tres buenos ejemplares de *blanco*, *negro* y *gris*, fue llevada a cabo tomando como único criterio el juicio de los experimentadores.

- *Mala representación de estímulos de baja saturación CIE.* Algunas investigaciones ni siquiera incluyen estímulos de baja saturación. Por ejemplo, Bonnardel (2006) realizó un muestreo sistemático del tono, pero empleó únicamente los estímulos del máximo croma disponible para cada uno de los 20 tonos del atlas Munsell que incluyó en su estudio. Lo mismo ocurre en los trabajos de Jameson y Hurvich (1978), Lillo, Davies et al. (2001) y Cole et al. (2006). Por tanto, únicamente pueden encontrarse estímulos de baja saturación en las investigaciones de Montag y Boynton (1987), Montag (1994), y, en mucha menor medida, en Lillo, Vitini et al. (2001). Cabe destacar que la mala representación de estímulos de baja saturación es una consecuencia lógica en aquellas investigaciones en las que el interés está orientado expresamente hacia el estudio de colores prototípicos, como es el caso de los trabajos de Lillo, Davies et al. (2001) y Cole et al. (2006).

B. Escasa distinción entre el uso de CCB ante prototipos y ante el resto de estímulos. En línea con lo dicho en el último párrafo, las investigaciones mencionadas suelen optar por estudiar bien el uso global de las CCB, o bien su uso restringido a estímulos prototípicos. Como consecuencia, no existen comparaciones explícitas entre el uso de las CCB cuando los estímulos

implicados son prototípicos y cuando no lo son. Esta falta de distinción puede conducir a importantes errores de interpretación de los datos obtenidos en un experimento. Por ejemplo, imaginemos que se nos informa de que un grupo de dicrómatas cometió un porcentaje concreto de errores ante una CCB concreta. Para interpretar correctamente este dato, es necesario conocer qué estímulo/s se emplearon para representar dicha CCB. Concretamente, si se usó el prototipo, es de esperar que el porcentaje de error del que se informa sea menor de lo que hubiera sido en caso de haberse empleado varios estímulos con el fin de representar la totalidad de la categoría.

C. Número y tipo de CCB estudiadas.

- En principio, únicamente la tarea de denominación libre, y la tarea de denominación monolexémica libre, o restringida si se permite el uso de todas las CCB, permiten estudiar el uso de la totalidad de dichas categorías. De las investigaciones mencionadas, únicamente las de Jameson y Hurvich (1978) (que emplearon una tarea de denominación libre) y las de Montag y Boynton (1987), Montag (1994), y Lillo, Davies et al. (2001) (que emplearon una tarea de denominación monolexémica) cumplirían este requisito. Por supuesto, si se pretende estudiar el uso de todas las CCB, de poco sirve permitir responder con cualquiera de ellas si en los estímulos utilizados no se encuentran convenientemente muestreadas en su totalidad. El trabajo de Lillo, Vitini et al., (2001) (que también empleó la tarea de denominación monolexémica), únicamente incluyó estímulos representativos de tres CCB.
- En el resto de los trabajos citados, no se estudió la totalidad de las CCB. Tal es el caso de la investigación de Bonnardel (2006), que sólo estudió las 8 CCB cromáticas, y Cole et al. (2006), que excluyeron de su investigación la CCB *rosa*.

D. Conexiones existentes entre categorías. Conocer cuáles son las conexiones entre CCB que se dan en protanopes y deuteranopes resulta de gran información, sobre todo si se comparan con las conexiones existentes en tricrómatas normales. Las únicas investigaciones que aportan información explícita al respecto son las de Montag y Boynton (1987) y Montag (1994). En la primera, se informó de que en los observadores dicrómatas, además de darse todas las conexiones presentes en los tricrómatas normales, se dieron otras conexiones

ausentes en estos últimos. Tres de estas *nuevas* conexiones se dieron en los 4 dicrómatas estudiados (2 protanopes y 2 deuteranopes en el Experimento 1, véase la Tabla 4.8): *verde-naranja*, *verde-marrón* y *azul-rosa* (como curiosidad histórica, puede consultarse Mollon, 2003, donde se comenta, entre otras, la confusión que experimentaba y describía el propio J. Dalton entre los colores de diversas flores rosáceas, por un lado, y el color azul del cielo, por otro). Montag (1994) volvió a obtener el mismo resultado sobre la conexión *verde-naranja* en los cuatro daltónicos dicrómatas que estudió (2 protanopes y 2 deuteranopes, Experimento 1, véase la Tabla 4.8).

E. Naturaleza y grado de los errores producidos. Resulta de máximo interés saber el tipo de errores que se dan en este tipo de observadores. Sin embargo, resulta paradójico que en la mayor parte de trabajos citados, salvo pequeños comentarios a lo largo del texto, no se aporta dicha información de forma explícita, ni cualitativa (qué CCB se confunden con otras), ni mucho menos cuantitativamente (en qué grado se dan las confusiones). Únicamente en Jameson y Hurvich (1978, Tablas 2 y 3), Lillo, Davies et al. (2001, Tabla 4; Lillo, Vitini et al., 2001, Tabla 3), y Cole et al. (2006, Figura 8) se muestra este tipo de información. Todas estas investigaciones emplearon un número reducido de estímulos. Desgraciadamente, los trabajos de Montag y Boynton (1987) y Montag (1987), que incluyen un muestreo estimular mucho más completo que el resto de investigaciones mencionadas, no ofrecen información relevante al respecto, al igual que ocurre con la investigación de Bonnardel (2006).

F. Tipo y número de dicrómatas estudiados. En algunas investigaciones únicamente se estudia el comportamiento de un tipo de dicrómata, como por ejemplo en el estudio de Bonnardel (2006), que se centró en daltónicos del tipo deután. El resto de investigaciones citadas incluyeron tanto protanopes como deuteranopes. En algunas de estas investigaciones se plantea la cuestión de si existen diferencias entre ambos tipos de daltónicos a la hora de emplear las CCB. Dentro de las investigaciones realizadas con estímulos monocromáticos, tal vez sea la de Nagy y Boynton (1979) la que más evidencia aporta acerca de que el uso que los protanopes hacen de los términos de color es más errático que el uso que hacen los deuteranopes. En lo que se refiere a estímulos de superficie, existen ciertos resultados que apuntan en esta dirección, aunque no de forma tan rotunda:

- Mientras que Jameson y Hurvich (1978) hipotetizaron que el uso de términos de color por parte de observadores protanopes sería más acertado que el de los deuteranopes (basándose en que presumiblemente los protanopes podrían aprovechar pistas extra, derivadas del hecho de que su sensibilidad espectral es mucho más diferente de la de los tricrómatas normales de lo que lo es la de los deuteranopes), en el resto de investigaciones, caso de recogerse diferencias, estas suelen estar a favor de los deuteranopes:
- Cole et al. (2006) no encontraron diferencias significativas ni en cuanto al número de errores ni tampoco en cuanto a la probabilidad asintótica del error (asociada a estímulos muy grandes, 0,061 para ambos grupos). Por su parte, en el trabajo de Lillo, Vitini et al. (2001) los protanopes cometieron significativamente más errores de denominación que los deuteranopes (tanto en un análisis global como específico para cada categoría: los estímulos pertenecientes a las CCB de *verde* y *morado* recibieron más respuestas erróneas por parte de los protanopes, lo que no ocurrió para *azul*).
- Ahora bien, a la hora de establecer este tipo de comparaciones, y de evaluar su generalizabilidad, es importante no sólo tener en cuenta el número de observadores que componen cada grupo, sino también estudiar si, en caso de existir diferencias entre protanopes y deuteranopes, estas se dan para todas las CCB o, en caso contrario, para qué categorías concretas. Y por supuesto, en este punto es de gran importancia establecer si existen diferencias en función del tipo de estimulación (estímulos prototípicos de las diferentes CCB vs resto de estímulos).

Para facilitar la comparación entre diferentes investigaciones, en la Tabla 5.1 se recogen algunas de las características comentadas en los párrafos anteriores.

Tabla 5.1. Características relevantes que afectan a la validez y utilidad de los datos obtenidos en diferentes investigaciones sobre CCB en daltónicos dicrómatas. DL: denominación libre. DML: denominación monolexémica libre. DMR: denominación monolexémica restringida. D: deuteranope, P: protanope, TN: tricrómatas normal.

Investigación	Muestreo de estímulos				Tarea	Matrices de confusión (conexiones entre CCB, y naturaleza y frecuencia de los errores cometidos)
	Nº EE	¿Representación adecuada de las CCB acromáticas?	¿Representación adecuada de estímulos con baja saturación?	¿Estudio específico de estímulos prototípicos?		
Jameson y Hurvich (1978)	16	No representadas	No representados (los estímulos del D-15 son de saturación media: croma = 4)	No	DL	Se indican las respuestas de los 3 D y de los 3 P (Tablas 2 y 3) para cada estímulo, que pueden compararse con las del TN (Tabla 1)
Montag y Boynton (1987)	424	Representación escasa, sobre todo de negro	Sí representados	No	DML	En el texto se informa sobre tres conexiones presentes en los 4 dicrómatas (2 P y 2D, Exp. 1), pero ausentes en los 2 TN: <i>verde-naranja</i> , <i>verde-marrón</i> y <i>azul-rosa</i> . No hay información sobre los errores
Montag (1994)	215					En el texto se informa sobre una conexión presente en los 4 daltónicos dicrómatas (2 P y 2 D, Exp. 1), pero ausente en el TN: <i>verde-naranja</i> . No hay información sobre los errores
Lillo, Davies et al. (2001)	11	Un único estímulo para representar cada una de ellas	No representados	Sí	DML	Se indica la frecuencia y la naturaleza de los errores cometidos por los 12 P y 18 D para cada estímulo (Tablas 4 y 3, respectivamente)
Lillo, Vitini et al. (2001)	12	No representadas	Sólo para 3 CCB	Sólo para 3 CCB	DML	
Cole, Lian, Sharpe, Lakkis (2006)	10	Un único estímulo para representar cada una de ellas	No representados	Sí (excepto la CCB rosa)	DL	Se indica gráficamente el porcentaje y la naturaleza de los errores cometidos por 59 daltónicos leves (15 PA, 44 DA) y 39 severos (7 P, 5 PA; 11 D, 16 DA) para cada estímulo (Figura 8)
Bonnardel (2006)	140	No representadas	No representados	No	DMR (8 CCB croma.)	La única manera de acceder a información sobre la naturaleza de los errores es de forma indirecta, comparando visualmente en la Figura 1 las matrices individuales de los 5 daltónicos (deutanes) con la matriz grupal de los 39 TN

En las páginas previas ha quedado suficientemente justificada la afirmación de que no existe un conocimiento sistemático del uso de CCB en daltónicos dicrómatas. En lo referente a la existencia de **modelos** que intenten articular conocimientos de carácter psicofísico con el uso de CCB, puede decirse que existen enormes lagunas. Concretamente: algunos de los modelos de visión del color en dicrómatas que se han publicado en la literatura especializada, y que tan acertados se han mostrado a la hora de predecir algunos comportamientos de carácter psicofísico, no se han ocupado explícitamente del problema de intentar predecir los datos derivados de la denominación del color. Y los que sí lo han hecho, se han centrado en intentar predecir resultados relativos a estímulos monocromáticos, consiguiendo aún así un escaso éxito.

Tomemos el siguiente ejemplo. El trabajo de Guth, Massof y Benzschawel (1980) es frecuentemente citado como un buen exponente dentro de los modelos de visión del color que proponen un esquema común para explicar resultados experimentales obtenidos tanto en tricrómatas normales como en dicrómatas. Para el caso de la visión normal del color, el modelo combina linealmente las respuestas de los tres tipos de conos para dar lugar a dos canales oponentes cromáticos (T o *rojo-verde*, y D o *amarillo-azul*) y uno acromático (A). En el caso de la visión dicrómata, se postula la combinación lineal de las respuestas de únicamente dos tipos de conos en un canal acromático (A) y otro canal oponente cromático (D). Pues bien, dicho modelo permite predecir, con bastante exactitud, diferentes resultados experimentales, como por ejemplo las funciones de discriminación de longitud de onda en ambos tipos de observadores (consúltense las Figuras 19, 25 y 26 de la publicación original).

Sin embargo, en lo que se refiere a la apariencia del color, además de ser incapaz de predecir la existencia de la respuesta de *rojo* ante longitudes de onda corta en tricrómatas normales, para dicrómatas únicamente menciona explícitamente la zona neutral del espectro, y por supuesto no contempla ningún tipo de discriminación *rojo-verde* residual en protanopes ni deuteranopes. Ya se comentó que Jameson y Hurvich (1955), quienes sí que tuvieron en cuenta la problemática de la denominación en dicrómatas, predijeron que, ante estímulos monocromáticos, a los daltónicos dicrómatas les bastaría con los términos *azul* y *amarillo* (aparte de *blanco*) para describir la apariencia del espectro visible. Como se ha desarrollado ampliamente en el apartado 1.4.2.1, sin embargo, a nivel empírico sucede algo muy diferente.

Por esta razón no es de extrañar que, para abordar específicamente la problemática que supone la denominación del color en dicrómatas, se haya recurrido a otro tipo de explicaciones y se hayan postulado **otro tipo de modelos, diferentes de los existentes**. Simplificando, las explicaciones ofrecidas en la literatura especializada para intentar dar cuenta de por qué el uso que hacen los daltónicos dicrómatas de las CCB es menos errático del que cabría esperar, pueden clasificarse en los dos extremos siguientes:

1. Por un lado, siguiendo la tradición de Jameson y Hurvich (1978), algunos autores argumentan que este tipo de observadores recurre a **pistas**, como las que por ejemplo pueden derivarse de su percepción (anómala) de la claridad, para denominar estímulos de color de forma más acorde a como lo hacen los tricrómatas normales.
2. En el otro extremo, siguiendo la tradición de Boynton y Scheibner (1967), algunos autores recurren a la existencia de cierto grado de **discriminación residual rojo-verde** para explicar dicho comportamiento.

Para ilustrar el hecho de que incluso a día de hoy los autores que se dedican a la percepción del color en dicrómatas se suelen decantar por uno de estos extremos, baste mencionar los trabajos de Bonnardel (2006) y de Wachtler et al. (2004), ambos comentados en el apartado 1.4.2.1, y que se encuadrarían, respectivamente, en uno los dos extremos mencionados. De forma coherente con sus puntos de vista y sus hipótesis de partida, como ya se ha mencionado, Bonnardel (2006) enfatizó el papel normativo del lenguaje y de los factores de aprendizaje, poniendo en duda que a través de las tareas que empleó se pudiera de hecho acceder a la representación perceptiva de los colores en observadores con alteraciones de la visión del color. Por su parte, el modelo propuesto por Wachtler et al. (2004), al centrarse en un mecanismo que posibilite la discriminación residual *rojo-verde*, predice erróneamente un uso mutuamente excluyente de estos dos términos en protanopes y deuteranopes.

En el trabajo de Lillo, Davies et al. (2001), se describe explícitamente un modelo cuyo objetivo es predecir los errores de denominación en daltónicos dicrómatas a partir del uso de líneas de confusión, el cómputo de la claridad anómala, y el volumen colorimétrico que ocupan las CCB. Este modelo puede encuadrarse dentro de lo que

aquí hemos denominado como la tradición de Jameson y Hurvich (1978). Sin embargo, habida cuenta de que este modelo sobreestimaba con mucho el número de errores cometidos, los autores incluyeron posteriormente una modificación en el mismo (Lillo, Vitini et al., 2001) para dar cabida a cierta discriminación residual, tal y como ya se ha descrito en el apartado 1.4.2.1, encuadrándose por tanto en lo que hemos denominado tradición de Boynton y Scheibner (1967).

Ya se ha comentado en el apartado 1.4.2.2 el debate existente sobre hasta qué punto existe compensación del sistema visual de cara a neutralizar los efectos que el progresivo amarillamiento del cristalino pudiera tener sobre la categorización del color. En esta tesis, intentaremos contribuir a este debate empleando observadores reales de edad avanzada, empleando el mismo método que con los daltónicos dicrómatas, y analizando los datos de la forma más similar posible.

Para resumir brevemente lo que se ha comentado hasta ahora: 1) no se dispone de datos sistemáticos sobre el uso de las CCB en daltónicos dicrómatas ni en personas envejecidas empleando estímulos de superficie, y 2) los modelos explicativos postulados para dar cuenta de los errores que cometen estas personas al denominar estímulos de color suelen presentar grandes lagunas, e incluso, como ocurre en ocasiones, graves errores. Contribuir a cambiar esta situación es la finalidad fundamental de esta tesis. Este objetivo general puede concretarse en los siguientes **objetivos específicos**:

1. A nivel *descriptivo*, se pretenden **delimitar las partes del espacio de color en las que se utiliza cada una de las CCB en los tres tipos de observadores estudiados**. La primera de las consideraciones que debe realizarse para cubrir este objetivo con garantías de éxito, se refiere al conjunto concreto de **estímulos** que debe emplearse. Como ya se ha indicado en un trabajo previo (consúltese Lillo et al. 2007), esto obliga a tomar una decisión más o menos arbitraria respecto a cómo se seleccionan los estímulos que se presentarán a los observadores (recuérdese que Pointer y Attridge, 1998, han estimado en unos 2,28 millones el número de colores de superficie discriminables por un observador común). Por razones que se comentarán más adelante, se ha optado

por incluir **criterios de tipo categórico** a la hora de realizar la selección de los estímulos a emplear.

2. A nivel *comparativo*, se pretende **comparar la delimitación efectuada por daltónicos dicrómatas y observadores mayores con defectos tritán con la realizada por sendos grupos de tricrómatas normales de referencia**. Como ya se ha comentado, actualmente se dispone de datos sobre el uso de las CCB en la población usualmente utilizada como referencia (Lillo et al., 2007), a saber, adultos jóvenes con visión normal del color. En principio, podrían usarse estos datos para compararlos directamente con los resultados obtenidos en los diferentes tipos de observadores con deficiencias en la visión del color estudiados en esta tesis. Sin embargo, se decidió incluir un **grupo de control para cada uno de los dos grupos mencionados**. Por una parte, se incluyó un grupo de control constituido por tricrómatas normales jóvenes para compararlo con el grupo de daltónicos dicrómatas, por el riesgo que suponía efectuar una transposición directa de los resultados obtenidos en investigaciones anteriores, ya que mientras que en dichas investigaciones se empleó la tarea de denominación, en esta tesis la tarea empleada era distinta. Por otra parte, la razón para incluir un grupo de control formado por observadores envejecidos es que el uso de las CCB puede mostrar diferencias de carácter generacional, lo cual podría contaminar la interpretación de los resultados obtenidos si únicamente se compararan los resultados del grupo de mayores con defectos tritán con los de controles jóvenes.
3. A nivel *explicativo*, se pretende evaluar la **validez de diferentes hipótesis** concernientes al uso de CCB, tanto en dicrómatas como en personas envejecidas, comparando las predicciones derivadas de dichas hipótesis con los datos empíricos obtenidos.

A continuación se presentan dos estudios diseñados para conseguir cubrir estos objetivos. El primero se centra en daltónicos dicrómatas, distinguiendo entre protanopes y deuteranopes. El segundo, se centra en observadores envejecidos, distinguiendo entre aquellos que presentan una visión normal del color, y aquellos que presentan un comportamiento que puede calificarse como anómalo de tipo tritán. Por tanto, en esta tesis se plantea cubrir objetivos de carácter tanto descriptivo, como comparativo y explicativo.

2.2. CAPÍTULO 6: ESTUDIO 1. USO DE TÉRMINOS DE COLOR BÁSICOS EN DALTONICOS DICROMATAS

Con el **objetivo** de **estudiar cómo emplean protanopes y deuteranopes los TCB**, se diseñó un estudio en el que se utilizó una metodología similar a la de Berlin y Kay (1969, véase el apartado 1.4.1.2). El primer paso era realizar una selección de estímulos que permitiese superar, en la medida de lo posible, algunas de las carencias referentes al muestreo estimular que se han comentado en el apartado anterior. Además, se deseaba contar con un número de estímulos no demasiado grande, puesto que interesaba que la tarea fuese no sólo lo más sencilla, sino también lo menos tediosa posible, por la sencilla razón de que estos mismos estímulos se emplearían también para estudiar los TCB en observadores envejecidos, como se explicará en el estudio 2, y en esta clase de observadores es muy importante evitar la intromisión de factores de tipo cognitivo ajenos a los puramente perceptivos.

De este modo, se procedió a preparar un **material estimular** que cumpliera las siguientes características:

1. Estar compuesto por colores de superficie.
2. Permitir la realización de dos tareas diferentes. Por un lado, una tarea de selección de estímulos pertenecientes a cada una de las distintas CCB, y por otro lado, una tarea de búsqueda de prototipos. Para poder conseguir esto, el conjunto de estímulos debía contener tanto ejemplares prototípicos de las 11 CCB como otros que no lo fueran.
3. Contener un número razonable de estímulos, considerando las características de los observadores que iban a participar en la investigación.
4. Ser fácilmente transportable, habida cuenta de los diferentes lugares en los que iban a realizarse las evaluaciones.

Empleando un material con dichas características, se pretende evaluar hasta qué punto, usando colores de superficie y una tarea de selección, el uso de las CCB genera confusión en personas con alteraciones en la visión del color (daltónicos dicrómatas y personas envejecidas). La tarea empleada exige presentar los estímulos

simultáneamente, y no de forma secuencial, como es práctica habitual en las investigaciones que emplean la tarea de denominación del color. Esta decisión se tomó por las siguientes **razones**:

1. Este tipo de tarea permite obtener resultados de forma más rápida que la denominación de color, reduciendo así el **tiempo de administración**. La importancia otorgada a esta característica reside tanto en el número de participantes que tomarían parte en el estudio, como al carácter individual de la evaluación, así como en el hecho de que la tarea debía desarrollarse en diferentes lugares con estrictas limitaciones de carácter temporal (como son las residencias de la tercera edad).
2. Los resultados obtenidos en la tarea de **búsqueda de prototipos** son **directamente interpretables** (consúltese Lillo et al., 2007), eliminándose por tanto la necesidad de recurrir a otro tipo de variable ajena a la respuesta categórica de los observadores como puede ser, por ejemplo, el tiempo de reacción (relacionado inversamente con el carácter prototípico de la estimulación).
3. Esta tarea permite que **un mismo estímulo** se incluya como ejemplar de **diferentes CCB**, un resultado que es lógicamente esperable si se parte del hecho de que los observadores con alteraciones en la visión del color tienen una discriminación cromática reducida. Este aspecto es muy importante por la siguiente razón. Cuando se emplea la tarea de denominación de color, puede optarse por diferentes versiones de la misma:
 - a. Puede emplearse la denominación monolexémica, ya sea libre (Montag y Boynton, 1987; Montag, 1994; Lillo, Davies et al., 2001; Lillo, Vitini et al., 2001), o restringida a las 11 CCB o a un subconjunto de estas (Cole et al., 2006; Bonnardel, 2006). En tal caso, cada estímulo recibe como respuesta una única CCB, por lo que es necesario presentar el mismo estímulo varias veces para que exista la posibilidad de que sea denominado mediante diferentes CCB, lo cual irremediablemente aumenta el tiempo de administración de la tarea (Montag y Boynton, 1987, Montag, 1994, y Cole et al., 2006 presentaron dos veces cada estímulo; el resto de investigaciones citadas sólo una vez).

- b. También puede optarse por la denominación libre (Jameson y Hurvich, 1978), o por la denominación restringida que permita el uso simultáneo de varios términos, como establecieron Boynton y Gordon (1965) y se ha empleado frecuentemente en investigaciones con observadores dicrómatas realizadas con estímulos monocromáticos (Boynton y Scheibner, 1967; Scheibner y Boynton, 1967; Nagy y Boynton, 1979; Paramei, 1996; Paramei, Bimler y Cavonius, 1998; Bimler y Paramei, 2004, 2005). Pues bien, en todos estos casos, sin excepción, se corre el riesgo de que los datos estén contaminados por un posible efecto no deseado, a saber, que los observadores eviten conscientemente el uso simultáneo de dos nombres que pueden estar en un “conflicto” a nivel cognitivo, es decir, nombres que un observador con visión normal del color nunca usaría conjuntamente para describir un mismo estímulo, como por ejemplo *rojo* y *verde* (Jameson y Hurvich, 1978). La única forma de evitar este efecto vuelve a ser la presentación reiterada de los estímulos, lo cual conduce nuevamente a un aumento del tiempo de administración de la tarea (esta objeción es igualmente válida cuando el método empleado es el escalamiento de tono, como ocurre en Wachtler, Dohrmann y Hertel, 2004).
- c. Como contraposición, en una tarea de selección en la que se presentan muchos estímulos simultáneamente, es virtualmente imposible que se retengan en la memoria qué estímulos concretos han sido seleccionados en cada ocasión, de manera que se intente evitar conscientemente seleccionarlos nuevamente bajo otra CCB que entre en “conflicto” a nivel cognitivo.

La tarea empleada y sus características son precisamente la razón por la que se incluyó un **grupo control** de tricrómatas normales jóvenes en este primer estudio, con cuyos resultados poder comparar los obtenidos por protanopes y deuteranopes: los datos previos sobre CCB en observadores con visión normal del color de los que disponíamos (Lillo et al., 2007) fueron obtenidos a partir de una tarea de denominación de color y en la que además la presentación de los estímulos fue secuencial. Por tanto, la comparación directa entre los resultados de dos tareas diferentes podría conllevar serios riesgos, y habría supuesto un error metodológico importante.

A continuación se describen los **objetivos específicos** que se pretendían cubrir en este primer estudio:

1. Localizar, para cada grupo de observadores, los **estímulos compatibles** con el uso de las diferentes CCB, así como sus prototipos o **mejores ejemplares**.
2. Establecer las **conexiones** detectadas entre CCB para cada grupo.
3. Detectar, para protanopes y deuteranopes, qué CCB se emplean con mayor **acierto**, y qué CCB generan más **errores**.
4. Establecer, a partir de un análisis pormenorizado, el grado y el tipo de los errores cometidos, para determinar cuáles son las confusiones más habituales entre CCB para cada grupo de observadores. Para ello, partiendo de la comparación entre los resultados obtenidos en daltónicos dicrómatas y tricrómatas normales, se construirá una **matriz de confusión** para cada grupo de dicrómatas, que especifique tanto la **naturaleza** como el **grado** de los **errores** cometidos. De esta manera se pueden extraer conclusiones generales acerca de qué pares de CCB son los menos susceptibles de generar confusión entre sí para cada grupo.
5. **Comparar** la ejecución de **protanopes y deuteranopes**, tanto a nivel global como a través de las diferentes CCB. De esta manera se intentará responder a un interrogante frecuentemente planteado: ¿quiénes se manejan peor a la hora de emplear nombres de colores, protanopes o deuteranopes?
6. Determinar si tanto el grado como el tipo de confusiones dependen del **tipo de estimulación** empleada (prototipos vs. resto de estímulos).
7. Evaluar la adecuación de dos **modelos diferentes de predicción** de errores en el uso de CCB en este tipo de observadores.
8. Además del análisis grupal, se efectuará un **análisis individual**, observador por observador, tanto de las conexiones entre CCB como de los errores cometidos (puntos 2, 3 y 4), puesto que si bien todos los observadores dentro de cada grupo son diagnosticados como protanopes o como deuteranopes, las investigaciones que emplean el método de denominación del color recogen sistemáticamente la existencia de grandes diferencias individuales dentro de cada grupo.

Nótese que mientras que los dos primeros puntos se centran en el estudio de los resultados a nivel *descriptivo*, los puntos 3-5 lo hacen a nivel *comparativo*, cotejando los resultados obtenidos por protanopes, deuteranopes y el grupo control, y evaluando la

influencia del tipo de estimulación empleada (punto 6). En el punto 7 se contempla el análisis de los resultados nivel *explicativo*.

Gracias a los primeros seis puntos, se pueden hacer **recomendaciones específicas** sobre las características que debe cumplir el uso de materiales cromáticos (ya sea con fines de codificación o de segmentación) en situaciones en las que los usuarios de los mismos puedan ser daltónicos, con el objetivo de reducir al mínimo las probabilidades de error. Respecto al punto 7, se comprobará **hasta que punto es posible predecir**, desde un punto de vista estrictamente colorimétrico (a partir de determinados supuestos), los errores que comenten este tipo de observadores.

Ahora bien, los objetivos planteados se refieren al análisis de los resultados obtenidos en protanopes y deuteranopes a nivel grupal. De hecho, estos resultados sentarán la base tanto para las conclusiones que se extraigan en esta tesis en lo que concierne al uso de CCB en estos observadores, como para las recomendaciones de carácter ergonómico que se realicen respecto a cómo reducir al mínimo su probabilidad de error. Precisamente por esta razón se incluye dentro de los objetivos el punto 8, que matizará y enriquecerá los resultados obtenidos a nivel grupal con los obtenidos mediante un **análisis individual**.

En lo que se refiere a los niveles *descriptivo* y *comparativo*, teniendo en cuenta las dos tareas que deben realizar los observadores, y los resultados obtenidos en las investigaciones comentadas en el apartado 1.4.2.1, se plantean diferentes **hipótesis** que se describen a continuación:

1. Se espera encontrar **conexiones** entre CCB en protanopes y deuteranopes que no existen en tricrómatas normales. Concretamente, se espera encontrar (al menos) las conexiones *verde-naranja*, *verde-marrón* y *azul-rosa* (Montag y Boynton, 1987; Montag, 1994).
2. Se espera que el **número de estímulos seleccionados** en la tarea de mapping para las CCB *verde* y *rosa* sea mayor en deuteranopes que en tricrómatas normales (Bonnardel, 2006).
3. A nivel cuantitativo, se esperan grandes diferencias en el **número de errores** cometidos para las distintas CCB. Sin embargo, a partir de los resultados

obtenidos en investigaciones previas, salvo excepciones, como se detallará a continuación, no es posible concretar demasiado esta hipótesis.

4. Respecto a la **naturaleza de los errores** (su distribución entre las diferentes CCB), se esperan diferencias en función de la CCB estudiada. Tal y como se ha comentado respecto al número de errores, y como podrá comprobarse a continuación, la facilidad para concretar esta hipótesis depende en gran medida de cuál es la categoría estudiada.
5. En caso de existir **diferencias significativas entre protanopes y deuteranopes**, se espera que se den en el sentido siguiente: los protanopes cometen más errores que los deuteranopes (Nagy y Boynton, 1979; Lillo, Davies et al., 2001).
6. El grado de acierto dependerá del **tipo de tarea**, de manera que se esperan menos errores para la tarea de prototipos que para la tarea de mapping (Lillo, Vitini et al., 2001; Lillo y Moreria, 2004a).

Efectivamente, los resultados obtenidos en investigaciones previas en lo referente al **número y naturaleza de los errores** en función de las **distintas CCB** son a veces muy **disparejos**, lo que merma la posibilidad de establecer hipótesis firmes para todas y cada una de ellas, como por otra parte no podría ser de otra manera, puesto que como se ha comentado en el apartado anterior, no se dispone de un conocimiento sistemático sobre el uso de CCB en protanopes y deuteranopes.

Las fuentes de información más detalladas pueden encontrarse en los trabajos de Lillo, Davies et al. (2001) y Cole et al. (2006). Teniendo en cuenta las diferencias existentes entre ambas investigaciones (consúltese la Tabla 4.9), es comprensible que no haya una coincidencia a nivel cuantitativo entre el **número de errores** encontrados para las diferentes CCB. Más sorprendente es que tampoco exista coincidencia a nivel ordinal, es decir, respecto a cuáles son las categorías para las que se encontraron más o menos errores en términos relativos, como se comentará a continuación:

- La más que notable excepción a la falta de coincidencia mencionada, se encuentra en el hecho de que en ninguna de las dos investigaciones se encontró error alguno para *amarillo*. En el otro extremo, *marrón* fue la categoría que recogió el mayor número de errores en Cole et al. (2006), siendo superada únicamente por *gris* (en el grupo de protanopes) en Lillo, Davies et al. (2001).

Más allá de estas coincidencias, pueden constatarse importantes discrepancias entre los resultados de ambas investigaciones:

- Por ejemplo, centrémonos en las CCB cromáticas **primarias** *rojo*, *verde*, *azul* y *amarillo*. Ya se ha dicho que *amarillo* no produjo errores en ninguno de los dos trabajos citados. De forma similar, *azul* registró muy pocos errores en ambas investigaciones. Sin embargo, mientras que en el trabajo de Lillo, Davies et al. (2001) *verde* y *rojo* también presentaron porcentajes de acierto muy elevados, en la investigación de Cole et al. (2006) *rojo* ocupó el segundo lugar, y *verde*, el cuarto, pero en cuanto a porcentaje de error. En lo referente a *blanco* y *negro*, mientras que para la primera puede considerarse que hubo acuerdo en ambos trabajos, al existir muy pocos errores, para *negro* se registraron más errores en Lillo, Davies et al. (2001) que en Cole et al. (2006).
- Respecto a las CCB **derivadas**, mientras que en el trabajo de Lillo, Davies et al. (2001) *gris*, *marrón*, *morado*, *naranja* y *rosa* presentaron (junto con *negro*) los mayores porcentajes de error, en la investigación de Cole et al. (2006) sólo *marrón*, como ya se ha comentado, y también *naranja*, mostraron relativamente muchos errores, cometiéndose muy pocos errores ante *morado* y *gris* (recuérdese que *rosa* no se incluyó en el estudio).

Respecto a la **naturaleza de los errores** (su distribución entre las diferentes CCB), a continuación se comentan tanto las coincidencias como las discrepancias detectadas en los resultados encontrados por Lillo, Davies et al. (2001) y Cole et al. (2006):

- *Azul*: para esta CCB existe plena coincidencia en ambas investigaciones, puesto que además de registrarse pocos errores, todos ellos se debieron al uso de la CCB *morado*.
- *Morado*: los errores se debieron fundamentalmente al uso de *azul* en ambos trabajos. Sin embargo, para el resto de categorías los resultados de ambas investigaciones son mucho menos concordantes:
- *Marrón*: en esta categoría los resultados muestran cierta coincidencia en el caso de los deuteranopes, y una total discrepancia en el caso de los protanopes. En Cole et al. (2006), la mayor parte de los errores, tanto en protanopes como en

deuteranopes, se acumularon en *rojo* y *verde* (y *naranja* en mucha menor medida). Por el contrario, mientras que en Lillo, Davies et al. (2001) la mayoría de los errores cometidos por protanopes se debió al uso de *negro*, y en mucha menor medida al uso *morado*, la mayoría de errores cometidos por los deuteranopes se debieron al uso de *negro* y *verde*, y en mucha menor medida al uso de *rojo*.

- *Rojo*: Mientras que en el trabajo de Cole et al. (2006) los errores se debieron fundamentalmente al uso de la CCB *marrón*, y en mucha menor medida al uso de *verde* (y *morado* pero sólo en protanopes), en Lillo, Davies et al. (2001) los errores se debieron al uso de *verde* (protanopes) y *naranja* (deuteranopes).
- *Gris*: los resultados obtenidos para esta categoría muestran una gran discrepancia en ambas investigaciones, tanto cuantitativa (como ya se ha comentado) como cualitativamente. Así, Lillo, Davies et al. (2001) registraron errores debidos fundamentalmente al uso de *verde*, *rosa*, *marrón* y *morado* (esta última únicamente en deuteranopes) frente a los escasos errores descritos en Cole et al. (2006), debidos al uso de *morado*.
- *Verde*: Frente al uso de *naranja*, *rojo* y *marrón* registrado por Cole et al. (2006), el único error descrito en Lillo et al. (2001) se debió al uso de *amarillo* (por un protanope).
- *Naranja*: Nuevamente existe una gran discrepancia entre los resultados de las dos investigaciones. Mientras que todos los errores registrados en Lillo, Davies et al. (2001) se debieron únicamente al uso de *amarillo*, en Cole et al. (2006) se debieron al uso de *verde*, *marrón*, *rojo* (y *gris* en protanopes).
- *Blanco y negro*: Respecto a *blanco*, Lillo, Davies et al. (2001) registraron pocos errores, debidos al uso de *amarillo*, *verde* (sólo en un protanope) y *rosa* (un deuteranope). Para *negro*, los errores, algo más frecuentes, se debieron al uso de *verde* y *marrón* (y *azul* pero sólo en deuteranopes). Cole et al. (2006) registraron muy pocos errores ante estas categorías y no informaron de su naturaleza.
- *Rosa*: los errores en esta CCB (únicamente estudiada en Lillo, Davies et al., 2001) se distribuyeron entre *rojo*, y, en el caso de los protanopes, también entre *gris*, *azul* y *blanco*.

Una vez expuestas las hipótesis referentes a los niveles *descriptivo* y *comparativo*, pasamos a describir las relativas al nivel *explicativo*. La esencia de estas hipótesis es que, partiendo de un **modelo** concreto de visión del color en daltónicos dicrómatas, se derivan **predicciones** específicas y contrastables sobre el **uso de CCB** en este tipo de observadores. El punto clave para poder conseguir esto, es la inclusión de información relativa a la categorización del color dentro de un modelo concreto de visión del color. Estas predicciones se cotejarán con los datos obtenidos en esta tesis, **evaluando así la utilidad** de los diferentes modelos para dar cuenta de la denominación del color de estímulos de superficie en protanopes y deuteranopes.

1. Modelo de simulación de la apariencia del color en dicrómatas. Tal y como se describió en el apartado 1.3.1.4, se han desarrollado modelos que, bajo determinados supuestos, simulan la apariencia del color en dicrómatas, de manera que para cualquier estímulo ofrecen una transformación colorimétrica que resulta indistinguible para un tipo de dicrómata concreto, y ante la cual tanto un tricrómata normal como ese tipo de dicrómata experimentan el mismo color. Puesto que las CCB derivan de la categorización del espacio de color, podríamos preguntarnos qué categorías persisten en un espacio de color que se ve reducido de las tres dimensiones propias de un tricrómata a sólo las dos de un dicrómata. Mediante la aplicación del algoritmo propuesto por Brettel, Viènot y Mollon (1997) es fácil demostrar que, ante cualquier estímulo de superficie, a un tricrómata normal le bastaría con emplear una submuestra de 6 CCB: *amarillo, marrón, azul, blanco, negro y gris*. Es decir, en principio no sería necesario el uso de *rojo, verde, rosa, naranja ni morado*.

2. Modelo de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada. La esencia de este modelo, que de ahora en adelante denominaremos **Modelo A**, es que la probabilidad de que exista confusión entre CCB aumentará cuando los estímulos denominados mediante dichas CCB (según los resultados obtenidos en tricrómatas normales) tengan, para el tipo de dicrómata de que se trate, 1) líneas de confusión con pendientes semejantes, y 2) claridades semejantes.

- a. Por supuesto, las predicciones del modelo pueden establecerse a dos niveles diferentes: a nivel específico, dado/s un/os estímulo/s concreto/s,

y a nivel global, permitiendo establecer predicciones sobre qué CCB tenderán a confundirse entre sí. Para ilustrar este aspecto, la Figura 6.1 muestra las líneas de confusión protanope (izquierda) y deuteranope (derecha) para los **prototipos** de algunas CCB. A modo de ejemplo, puede verse cómo los prototipos de las CCB *rojo*, *naranja* y *amarillo* están prácticamente alineados a lo largo de una línea de confusión para observadores deuteranopes (Figura 6.1). Sin embargo, puesto que un diagrama de cromaticidad no muestra información acerca de la intensidad de la estimulación, este tipo de representación oculta que la claridad de los prototipos de *amarillo*, *naranja*, y *rojo* (recuérdese que se trata de colores de superficie) es, respectivamente, muy alta, media, y baja, razón por la cual no se esperan confusiones entre los prototipos de dichas categorías, en contra de lo que cabría esperar a partir de la semejanza de sus líneas de confusión. Sin embargo, algo muy diferente ocurre cuando extendemos este razonamiento más allá de los prototipos, al **volumen total de las CCB**, puesto que en este caso se amplía el rango de pendientes de las líneas de confusión y de claridades para cada una de ellas. En tal caso, sí que pueden existir estímulos que, perteneciendo a diferentes CCB para un tricrómatas, tengan claridad y pendientes semejantes, y para los que por tanto sí se espera confusión. Por ejemplo, partiendo de este modelo no se esperaría confusión alguna entre las CCB *rojo* y *amarillo*, porque sus rangos de claridad no se solapan, pero sí que se esperaría confusión entre la categoría de *rojo* y otras como *marrón*, *verde* y *naranja* (nótese que en este caso se predicen confusiones entre las CCB de *rojo* por un lado y de *marrón* y *verde* por otro, lo que no ocurre si nos centramos exclusivamente en las posibles confusiones entre prototipos, tal y como se ha descrito anteriormente).

- b. Este modelo puede considerarse como una instanciación concreta de lo que hemos denominado tradición de **Jameson y Hurvich (1978)**, y coincide plenamente con el **Modelo 1** descrito en Lillo, Vitini et al. (2001; consúltase Lillo, Davies et al., 2001), que fue descrito en el apartado 1.4.2.1. Así, por ejemplo, en la Tabla 1 de Lillo, Davies et al. (2001), donde se utilizó el mismo modelo predictivo, puede verse que para el estímulo que representaba la CCB *rojo* se predijo el uso

(equiprobable) de *verde*, *naranja*, *rosa* y *marrón* en observadores deuteranopes.

- c. Nótese que la diferencia fundamental con el uso del modelo de simulación de la apariencia del color descrito en primer lugar, se puede concretar de la siguiente manera: mientras que en el primer caso, para un estímulo concreto, se realizaría la predicción a partir de las CCB que emplearía un tricrómatas normal ante un nuevo estímulo resultado de aplicar el algoritmo de Brettel, Viènot y Mollon (1997), en el segundo caso la predicción incluye a todas las CCB cuyo volumen colorimétrico es atravesado por la línea de confusión correspondiente, lo que permite incluir las categorías *rojo*, *verde*, *rosa*, *naranja* y *morado*.

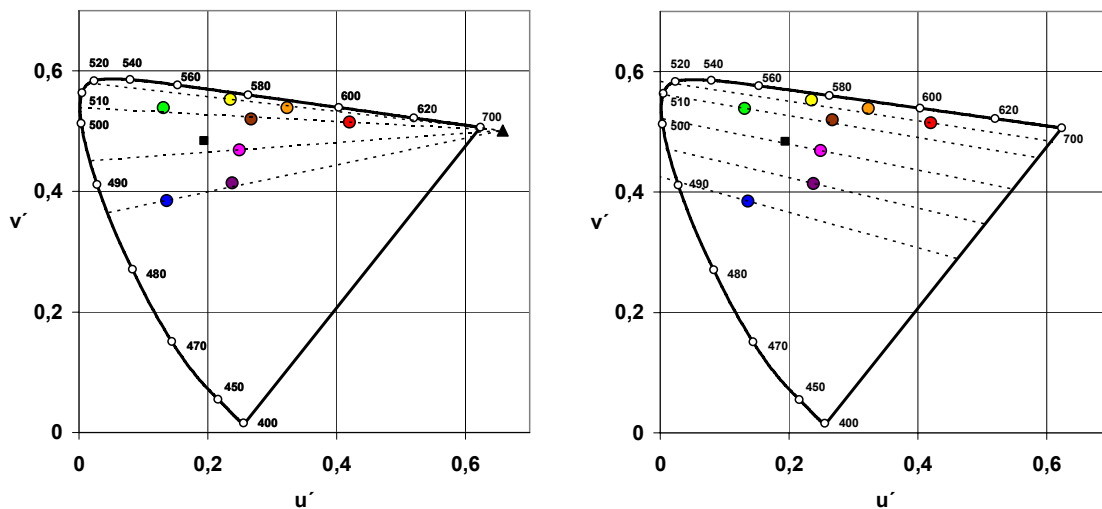


Figura 6.1. Prototipos de las CCB cromáticas en tricrómatas normales y líneas de confusión para daltónicos dicrómatas. Se muestran las líneas de confusión protanope (izquierda) para los prototipos de *amarillo*, *rojo*, *rosa*, y *azul*, y las líneas de confusión deuteranope (derecha) para los prototipos de *rojo*, *verde*, *rosa*, *morado*, y *azul*. Las coordenadas cromáticas de los prototipos de cada CCB se han obtenido a partir de los resultados de una tarea de búsqueda de foci empleada por Lillo et al. (2007, tabla 4). Las coordenadas cromáticas de los puntos de confusión se han obtenido de Regan, Reffin y Mollon (1994, véase la sección 1.3.1.3).

- 3. Modelo de predicción de errores (basado en líneas de confusión y claridad transformada) incluyendo discriminación residual *rojo-verde*.** Lo esencial de este modelo, que desde ahora denominaremos **Modelo B**, es que, a diferencia de los anteriores, se asume la existencia de una actividad *rojo-verde* residual que ayuda a los observadores dicrómatas a cometer menos errores de los que en

principio cabría esperar a raíz de la hipótesis de la reducción y de las pistas aportadas por la claridad.

- a. Volviendo a la Figura 6.1, las predicciones con respecto a los **prototipos** serían prácticamente idénticas a las descritas para el modelo previo, puesto que la claridad continúa siendo la salvaguarda que impide que se produzcan dichas confusiones. Por el contrario, la diferencia fundamental entre ambos modelos se concreta en lo relativo a las confusiones predichas **entre CCB**. Por ejemplo, tal y como se ha hecho explícito, desde el Modelo A se predice que los deuteranopes mostrarán confusiones entre *rojo*, *marrón* y *verde*. Sin embargo, desde el Modelo B se esperaría que, aun igualando los estímulos en claridad (para observadores deuteranopes), debería existir un mayor grado de confusión entre *rojo* y *marrón* o entre *verde* y *marrón* que entre *rojo* y *verde*.
- b. Evidentemente, este tipo de modelo puede considerarse dentro de la tradición de **Scheibner y Boynton (1967)** descrita en el apartado 1.4.2.1. En dicho apartado ya se comentó que el **Modelo 2** propuesto en Lillo, Vitini et al. (2001), también incluía en sus predicciones el efecto de cierta discriminación residual *rojo-verde*. Sin embargo, la forma de poner a prueba dichas predicciones fue estudiar el efecto de la saturación (CIE) sobre la frecuencia de los errores cometidos, bajo el supuesto subyacente de la existencia de un tercer tipo de cono residual (Montag, 1994). **En esta tesis se empleará una aproximación diferente:**
- c. Como ya se ha comentado, la convergencia de las investigaciones genéticas y psicofísicas recientes ha mostrado que incluso en aquellos observadores en cuyo genoma sólo se codifican dos tipos de conos, puede existir discriminación residual *rojo-verde* (Crognale et al., 1999; Wachtler, Dohrmann y Hertel, 2004). Tal y como se describirá detalladamente más tarde, en esta tesis se intentará **estimar la magnitud de la actividad residual rojo-verde**, permitiendo así estudiar su **efecto sobre la probabilidad de error**, pero evitando recurrir a ningún mecanismo concreto (con una sensibilidad espectral determinada) que sustente dicha actividad.

No cabe duda de que, con mayor o menor acierto, los daltónicos dicrómatas emplean todas las CCB (Montag y Boynton, 1987; Montag, 1994; Lillo, Davies et al., 2001). Este hecho elimina la posibilidad de poder explicar exclusivamente su comportamiento a partir de las categorías que emplearía un tricrómatas normal según un modelo de simulación de la apariencia del color como el de Brettel, Viènot y Mollon (1997) (recuérdese que en tal caso bastaría con el uso de *amarillo, marrón, azul, blanco, negro y gris*).

Podemos entonces concretar el punto 7 de los objetivos específicos descritos más arriba de la siguiente manera: “Evaluar la adecuación de dos **modelos diferentes de predicción** de errores en el uso de CCB en este tipo de observadores, los Modelos A y B”. De estos dos modelos, ¿cuál se considera más acertado? A partir de la investigación realizada con protanopes y deuteranopes, y teniendo en cuenta las características de la estimulación empleada en este trabajo, constituida por estímulos que proyectan unos 4° (consúltase el epígrafe *Tricromatismo en observadores dicrómatas ante estímulos de gran tamaño*, en el apartado 1.3.1.1), se espera que, aunque las predicciones del **Modelo A** puedan mostrarse hasta cierto punto adecuadas en lo referente a la naturaleza (el tipo) de los errores cometidos, dicho modelo **sobreestima** el número de los mismos (Lillo, Davies et al., 2001; Lillo, Vitini et al., 2001), de manera que el comportamiento exhibido por estos observadores se adecue mucho mejor a lo expresado por el **Modelo B**. Además, como ya se ha hecho explícito, se estudiará **cuantitativamente** la **relación existente entre la magnitud de la actividad rojo-verde residual y la probabilidad de error, algo inédito en este tipo de investigaciones sobre daltónicos dicrómatas y CCB**.

MÉTODO

Participantes

En este estudio tomaron parte un total de 32 participantes: 15 observadores jóvenes con visión normal del color, que conformaron el grupo control (con edades comprendidas entre los 19 y los 24 años; edad media 21,4 años; 6 hombres y 9 mujeres), y 17 daltónicos dicrómatas (todos ellos hombres), de los cuales 8 eran protanopes (rango de edad: 17-36; edad media, 23,5) y 9 deuteranopes (rango de edad: 24-52; edad media: 32,5). La Tabla 6.1 resume esta información.

Tabla 6.1. Observadores que tomaron parte en el Estudio 1. Para cada grupo se muestra el número de participantes, así como el rango de edad, la edad media (y la desviación típica) en años.

Grupo		N (hombres, mujeres)	Rango de edad	Edad media (desviación típica)
Control		15 (6, 9)	[19 - 24]	21,40 (1,85)
Daltónicos	Protanopes	8 (8, 0)	[17 - 36]	23,50 (5,85)
	Deuteranopes	9 (9, 0)	[24 - 52]	34,67 (10,87)
	Total	17 (17, 0)	-	-
Σ		32 (23, 9)	-	-

Los 15 participantes del grupo control eran alumnos de la Facultad de Psicología de la UCM. Los 17 observadores daltónicos eran: alumnos de la Facultad de Psicología de la UCM ($n = 1$), familiares de alumnos (4), amigos de alumnos (2), familiares de amigos de alumnos (3), y por último, contactos directos (4) o indirectos (3) de los investigadores.

El diagnóstico de la visión del color se llevó a cabo mediante la aplicación de los tests Ishihara (*Tests de Ishihara para evaluar la deficiencia cromática*, Ishihara, 1996), CUT (*The City University Colour Vision Test*, Fletcher, 1980) (ambos muy sensibles para detectar defectos tipo *protan* y *deutan*) y Lanthony (Album Tritan, Lanthony, 1985) (sensible para detectar defectos tipo *tritán*), bajo las condiciones de iluminación indicadas por dichos tests.

Si el observador no cometía ningún error durante la aplicación de estos tests, era clasificado como observador con *visión normal del color*. Si únicamente cometía algún error en la aplicación del test Lanthony (lo que únicamente ocurrió para algunos

observadores de la tercera edad, como se describirá en el siguiente estudio), era clasificado como un observador con *déficit tritán*. Por último, si cometía algún error en la aplicación de los tests Ishihara y CUT, era posteriormente evaluado mediante la aplicación del anomaloscopio. El diagnóstico final de *protanopia*, *deuteranopia*, *protanomalia* o *deuteranomalia* se realizó a partir de los ajustes tipo *Rayleigh*, realizados en el anomaloscopio (tal y como fue explicado en el apartado 1.3.1.1). En este estudio únicamente se informa de los resultados obtenidos por observadores protanopes y deuteranopes, diagnosticados como dicrómatas puesto que aceptaron el rango completo de ajustes. El diagnóstico diferencial entre protanopes y deuteranopes se realizó a partir de la cantidad del amarillo de referencia que cada observador necesitó para metamerizar los primarios rojo y verde.

Materiales, estímulos e instrumentos

Para confeccionar un material estimular que incluyera un número razonable de colores de superficie de diferentes CCB así como sus prototipos, se recurrió a los trabajos realizados previamente por nuestro equipo de investigación (descritos en el apartado 1.4.1.2). Concretamente, se partió de la localización de las CCB del castellano y de sus prototipos en el espacio CIELUV, establecida a partir de estudios de denominación de color y de búsqueda de prototipos empleando como colores de superficie las muestras del atlas NCS. A continuación se describen brevemente los aspectos esenciales del sistema NCS.

El sistema de *ordenación del color* NCS (*Natural Color System*, Hård, Sivik, y Tonnquist, 1996a, 1996b) parte de la teoría de los procesos oponentes de Ewald Hering para establecer criterios de ordenación e identificación del color¹ (Hering, 1878, véase Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 7). En este sentido, podría considerarse una extensión de la cuantificación que de dicha teoría realizaran Hurvich y Jameson (1955; Jameson y Hurvich, 1955; véanse la ecuación (28) y la Figura 4.1B) a los colores de superficie. Además de un sistema de ordenación de color, puesto que la lógica de la que parte el sistema NCS se asienta sobre los principios de la percepción del color, siguiendo a

¹ Para una breve descripción del sistema NCS, pueden consultarse las siguientes referencias: Hunt (1985, secciones 7.7 y 7.8); Kaiser y Boynton (1996, capítulo 11); Lillo, Moreira y Gómez (2002); Capilla, Artigas y Pujol (2002, capítulo 5); Brainard, 2003.

Wyszecky y Stiles (1982, sección 6.6), puede ser considerado también un sistema de *apariencia del color*.

De esta manera, a partir de las seis sensaciones de color básicas, blanco (w), negro (s), amarillo (y), azul (b), rojo (r), y verde (g), el sistema NCS describe cualquier color de superficie, de acuerdo a la siguiente notación. En primer lugar, se establece el nivel de negrura (s) y de blancura (w) del estímulo, así como su contenido cromático, c ($c = r + g + y + b$), de tal manera que $w + s + c = 100$. Puesto que estos tres valores han de sumar siempre 100, la notación NCS prescinde de uno de ellos, w , expresando únicamente s y c . En segundo lugar, el tono de cualquier estímulo se expresa mediante las proporciones correspondientes de las cuatro sensaciones cromáticas básicas: rojo, verde, amarillo y azul. Los tonos únicos se expresan mediante Y, R, B y G, y puesto que las combinaciones rojo-verde y amarillo-azul no son posibles, las combinaciones de tono se expresan mediante las siguientes 4 escalas de tono: YR, RB, BG y GY, especificándose con un número entre ambas iniciales el porcentaje del segundo de estos dos tonos. Así, por ejemplo, S 2035 Y50R se corresponde con un estímulo de 20 de negrura y 35 de contenido cromático (y por tanto de blancura $45 = 100 - 20 - 35$), y en el que se da la misma proporción de amarillo y de rojo (la S indica simplemente que se está empleando la segunda edición del atlas NCS). Las muestras acromáticas se expresan simplemente como la mezcla de las dos sensaciones básicas w y s . Así, por ejemplo S N – 5000 es la notación para un gris medio (en el que $s = w = 50$, y $c = 0$).

Gracias a la base de datos sobre CCB, se pudo realizar un muestreo racional del espacio de color que representara adecuadamente todas las categorías. Se seleccionaron 1) los prototipos de las 11 CCB, 2) las transiciones entre categorías (representadas por aquellos estímulos denominados alternativamente mediante dos categorías), y 3) estímulos situados a la mitad de distancia CIELUV entre los prototipos y las transiciones.

Como puede observarse, una característica esencial de este muestreo es que se basa en criterios categóricos, en lugar de hacerlo exclusivamente en criterios colorimétricos. Esta es la única manera de asegurar la representación de todas las CCB sin elevar demasiado el número de estímulos empleados. Este muestreo resultó en un

total de 102 estímulos, cuyas coordenadas cromáticas se representan en la Figura 6.2, y que presenta las siguientes ventajas:

- Tanto las CCB cromáticas como las acromáticas están representadas adecuadamente.
- Hay una representación adecuada de estímulos de baja saturación.
- Se incluyen tanto estímulos prototípicos como no prototípicos.

Una consulta detallada de la columna con el encabezado “*muestreo de estímulos*”, de la Tabla 4.9, presente en la introducción de la parte empírica de esta tesis, permite constatar rápidamente que los estímulos empleados en las diferentes investigaciones sobre CCB en daltónicos dicrómatas comentadas en dicha introducción en ningún caso cumplen simultáneamente con estas tres características.

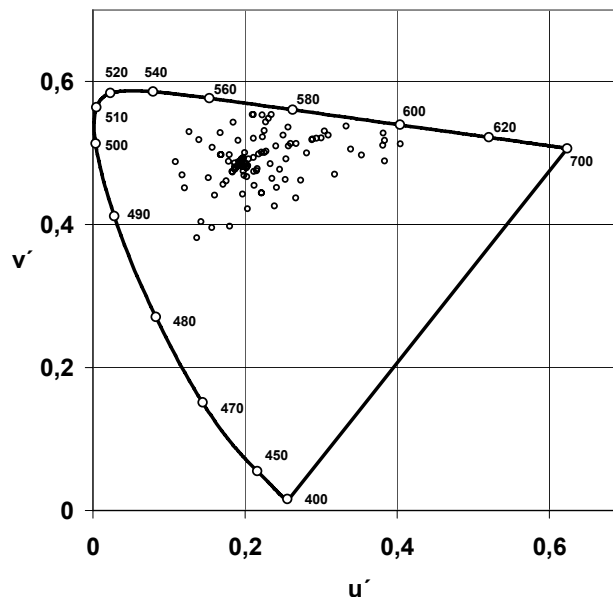


Figura 6.2. Representación de las coordenadas cromáticas de los estímulos empleados en los estudios descritos en la presente tesis. En el texto se detalla el procedimiento de muestreo seguido para seleccionar estos estímulos, así como la instrumentación colorimétrica empleada para realizar las mediciones.

Cada uno de los estímulos empleados tenía forma de cuadrado, de unos 3,5 cm de lado. Los estímulos se presentaron sobre un fondo gris de claridad media (N-5000; $L^* = 50$), repartiéndose sobre tres cartulinas que sirvieron como soporte. De esta manera, el conjunto estimular resultaba fácilmente manejable y transportable. El tamaño

de cada una de las tres hojas empleadas para presentar los estímulos es el estándar A4: 21 x 29,7 cm. En términos de grados de ángulo visual, a una distancia de 50 cm, cada estímulo proyectaba unos 4° (unos 5,5° si se toma la diagonal), cada hoja 23,72° x 33,08°, y las tres juntas y yuxtapuestas (63 x 29,7 cm) 64,42° x 33,08°.

Se realizaron mediciones tanto fotolorimétricas como espectrorradiométricas de cada uno de los estímulos, empleando un espectrorradiómetro Photo Research Spectrascan PR-650 conectado a un PC. En ambos tipos de mediciones, las condiciones de iluminación fueron idénticas a las utilizadas al realizar las tareas (se describen a continuación). Igualmente, la geometría de la medida fue acorde a la que debían adoptar los observadores, obteniéndose, para cada estímulo, su luminancia, sus coordenadas cromáticas, y su distribución de radiancia espectral (caso de haber necesitado conocer la reflectancia espectral de las muestras, se habría empleado alguna de las geometrías de medición estándar recomendadas por la CIE, consúltase Wyszecki y Stiles, 1982, sección 3.7.7). También se emplearon un luxómetro TES-1330 para efectuar mediciones del nivel de iluminancia y un termocolorímetro Gossen colourmaster3F para medir la temperatura correlacionada del color.

Los estímulos se presentaron dentro de una cabina cuyas características permitieron un control detallado de las condiciones de observación, idénticas a las empleadas previamente en la evaluación colorimétrica del atlas NCS y en el estudio de las CCB del castellano (consúltase Lillo, Moreira y Gómez, 2002, Lillo et al., 2007). Como fuente se emplearon lámparas incandescentes, cuya temperatura correlacionada del color fue incrementada de 3630 K a unos 5800 K mediante el uso de filtros correctores Rosco (consiguiendo así un iluminante muy similar al iluminante C recomendado por el atlas). Después de pasar a través de un filtro difusor, la luz emitida por las lámparas iluminaba el interior de la cabina de observación, pintado de gris medio en su totalidad. La iluminancia sobre los estímulos fue de unos 225-250 lux. La estructura de la cabina así como el ángulo de observación impidieron la existencia de reflexión especular.

Procedimiento

Cada participante fue citado y recibido en la Facultad de Psicología de la UCM. Tanto la administración de las pruebas de evaluación de la visión del color, como la realización de las tareas de selección, fue de carácter individualizado, efectuándose en el laboratorio de Psicología del Trabajo y en una cabina Faraday de la UCM. Previamente a la evaluación, se agradeció a los observadores su participación en la investigación, informándoles brevemente de que se pretendía estudiar cómo las personas daltónicas manejan materiales cromáticos, pero sin especificar en ningún momento el objetivo de la investigación.

Una vez evaluada la visión del color (véase el apartado de *Participantes*), cada uno de los observadores realizó, bajo las condiciones de observación descritas anteriormente, dos tareas diferentes:

- En la **tarea de selección de mejores ejemplares (foci o prototipos)**, se indicaba a los observadores que debían señalar el mejor ejemplar o prototipo de cada una de las CCB.
- En la **tarea de mapping** (o mapa de colores), se indicaba a los observadores que debían señalar todos los estímulos que podían ser nombrados mediante el uso de un TCB.

En ambas tareas, las diferentes categorías se iban indicando de una en una, de manera que la búsqueda era secuencial. La presentación de los estímulos fue simultánea (consúltese la introducción del presente estudio empírico para repasar las razones por las que se optó por este tipo de presentación, y el apartado de *Materiales, estímulos e instrumentos* para ver una descripción detallada del material estimular empleado). El orden de búsqueda de las CCB varió aleatoriamente entre los observadores, para evitar que posibles efectos de aprendizaje y fatiga se acumularan sobre unas categorías determinadas, y la distancia de observación se fijó en unos 50 cm aproximadamente. El experimentador siempre se cercioró de que, para cada una de las categorías, se observasen las tres hojas que contenían la totalidad de los estímulos.

La recogida de datos la realizaba el experimentador sobre un total de doce plantillas impresas, que mimetizaban la distribución de los diferentes colores de superficie en el material estimular previamente descrito, identificándolos con su denominación NCS. De esta manera, para cada observador se recogían las respuestas (estímulos seleccionados) para cada CCB tanto en la tarea de mapping (una hoja de respuesta por cada una de las once categorías), como en la tarea de búsqueda de prototipos (una única hoja de respuesta para los once estímulos seleccionados como prototipos). Posteriormente se procedía a codificar las respuestas en una base de datos informatizada, de manera que se indicaba, para cada uno de los estímulos, si había sido o no seleccionado en la tarea de mapping para cada una de las CCB, y si había sido seleccionado como prototipo de alguna CCB (los detalles de la codificación se describirán en el apartado de Resultados).

Durante la administración de las pruebas de evaluación de la visión del color así como durante la realización de las tareas de búsqueda, caso de necesitarla, los observadores llevaban la corrección óptica pertinente (en ningún caso los cristales de las gafas fueron tintados).

Todos los observadores participaron voluntariamente en el estudio, y como gratitud a su colaboración desinteresada, una vez completadas las tareas de selección, fueron informados sobre diferentes aspectos relacionados con el daltonismo. Concretamente, se procedió a exponer su origen genético, su relación con la alteración de los fotopigmentos de los fotorreceptores de la retina, los diferentes tipos de daltonismo existentes, el diagnóstico realizado en su caso, y la aparente discrepancia existente entre el desempeño obtenido en una tarea como la que supone el anomaloscopia, por un lado, y el uso cotidiano de los términos de color por otro. El tiempo total de la evaluación de la visión del color, de la realización de las tareas de selección, y de la exposición final, fue de aproximadamente dos horas para cada uno de los observadores.

RESULTADOS: TAREA DE MAPA DE COLORES

Con el objetivo de que sea lo más clara posible, la exposición de los resultados obtenidos en la tarea de mapa de colores se dividirá, de forma acorde al planteamiento de los objetivos específicos, así como a las hipótesis formuladas en la introducción de este estudio, en los siguientes apartados:

- *Conexiones entre categorías:* a partir de los mapas de colores de observadores protanopes, deuteranopes y tricrómatas normales, se establecerán las conexiones existentes entre categorías para cada grupo (y también para cada individuo). Concretamente:
 - Se construirán matrices de confusión que resuman las conexiones.
 - Estas matrices de confusión se utilizarán como entrada en diferentes análisis de escalamiento multidimensional (MDS) con el doble objeto de 1) dilucidar cuáles son las dimensiones más relevantes, para cada grupo de observadores, que sirven de base para discriminar entre las diferentes categorías, y 2) poder visualizar en un espacio de dimensionalidad reducida, para cada grupo de observadores, las coordenadas de las diferentes categorías en las dimensiones resultantes, así como las distancias (reproducidas) entre ellas.
- *Frecuencia y distribución de los errores:* se compararán las respuestas de los diferentes grupos de observadores en diversas variables. Concretamente:
 - Tomando como grupo de referencia el grupo control formado por tricrómatas normales, se construirán matrices de confusión para protanopes y para deuteranopes (tanto a nivel grupal como individual), que resuman el porcentaje de aciertos así como la naturaleza de los errores cometidos.
 - Se realizarán análisis comparativos a nivel grupal de las siguientes variables dependientes: porcentaje de errores y frecuencia de selección
- *Análisis colorimétrico.* Se realizarán los análisis colorimétricos pertinentes para evaluar la adecuación de los Modelos A y B descritos en la introducción de cara a explicar el uso de las CCB en protanopes y deuteranopes.

I. Conexiones entre categorías

Para cada observador se construyó una matriz rectangular de dimensiones 11 x 102 (CCB x EE) que resumía sus respuestas en la tarea de mapa de colores. Concretamente, se codificó cuáles de los estímulos (columnas) fueron seleccionados dentro de cada CCB (fila) por parte de cada observador, introduciendo un 1 en las celdas correspondientes, y un 0 en las restantes. De esta manera se construyó un total de 32 matrices individuales de datos (15 TN, 9 D y 8 P) de forma rectangular y dimensiones $n \times p = 11 \times 102$, con la estructura siguiente:

$$X = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1j} & \dots & X_{1p} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2j} & \dots & X_{2p} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X_{i1} & X_{i2} & \dots & X_{ij} & \dots & X_{ip} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nj} & \dots & X_{np} \end{bmatrix}$$

Por tanto, los datos se codificaron en tres dimensiones o, siguiendo el vocabulario estándar, “tres vías” (three way: CCB x EE x observadores; Martínez Arias, 1999; Real Deus, 2001). A partir de estas matrices individuales, se construyeron tres matrices grupales, simplemente sumando las matrices correspondientes a los observadores de un mismo grupo.

La información que aportan este tipo de matrices es de gran utilidad de cara al estudio de las **conexiones** entre categorías, puesto que es posible conocer si un mismo estímulo ha sido seleccionado como perteneciente a dos (o más) CCB (recuérdese que la búsqueda de estímulos compatibles con las diferentes CCB era secuencial).

Para determinar las conexiones existentes entre CCB en los tres grupos de observadores, y la fuerza de dichas conexiones, se llevó a cabo el siguiente análisis:

1. El criterio seguido para determinar la existencia de conexiones fue que al menos un estímulo hubiera sido seleccionado en la tarea de mapping como perteneciente a ambas CCB.

2. Para cuantificar la fuerza de las conexiones entre categorías, se siguieron tres estrategias diferentes, derivándose de cada una de ellas una matriz cuadrada de dimensiones $n \times n = 11 \times 11$:
 - Estrategia A: Para todos aquellos estímulos para los cuales se empleó un determinado TCB, se determinó 1) la frecuencia de selección de los 11 TCBs, es decir, el número de ocasiones en el que se utilizó el TCB objeto de estudio, así como 2) el número de ocasiones en el que se utilizaron los demás TCBs. Esta distribución de frecuencias se convirtió a porcentajes, para estimar la fuerza de las conexiones (de manera que la suma de cada una de las filas de la matriz de confusión fuese igual a 100). Las matrices de confusión obtenidas siguiendo esta estrategia se muestran en las Tablas 6.2.1-6.2.3.
 - Estrategia B: Comparte los dos primeros pasos de la estrategia A, pero el paso final para estimar la fuerza de la conexión entre TCB_i y TCB_j fue computar, del uso total de TCB_j , el porcentaje de uso simultáneo con TCB_i (de manera que el valor máximo para cada casilla fuese igual a 100). Las matrices de confusión obtenidas siguiendo esta estrategia se muestran en las Tablas 6.3.1- 6.3.3.
 - Estrategia C: Para cada observador, se creó una matriz cuadrada 11×11 (CCB x CCB) introduciendo en cada casilla un uno si existió la conexión correspondiente y un cero si no existió. Después se obtuvo una **matriz de frecuencias de confusión** para cada grupo (simplemente sumando las matrices individuales), que contenía el número de observadores que mostró la conexión (esta estrategia es similar a la empleada por Bonnardel, 2006, para crear matrices grupales a partir de los datos derivados de tareas de clasificación libre, restringida, y de denominación de color). Las Tablas 6.4.1-6.4.3 muestran estas matrices de frecuencias confusión.
3. Empleando el criterio y las tres estrategias descritas, se han determinado las conexiones entre CCB y las fuerzas de dichas conexiones:
 - A nivel grupal. Los resultados se resumen en un total de 9 matrices de confusión (una para cada grupo de observadores y cada estrategia), que, como ya se ha indicado, se muestran en las Tablas 6.2.1-6.2.3, 6.3.1- 6.3.3 y 6.4.1-6.4.3.

- A nivel individual. Los resultados se resumen en un total de 96 matrices de confusión (15 x 3 para tricrómatas normales, 8 x 3 para protanopes y 9 x 3 para deuteranopes, como resultado de aplicar las tres estrategias diferentes para cuantificar el grado de conexión entre CCB para cada uno de los observadores). Por razones de espacio, dichas matrices no se muestran.
- Gracias a este análisis se han podido establecer las siguientes comparaciones intergrupo:
 - i. Las conexiones que existen (a nivel grupal) en observadores dicrómatas (protanopes y deuteranopes), pero no en tricrómatas normales.
 - ii. El número de observadores, dentro de cada grupo, en los que de hecho se dan las diferentes conexiones. Las Tablas 6.5.1. y 6.5.2. resumen los resultados obtenidos.

En las tablas a las que se ha hecho referencia, así como en las figuras que corresponda, se emplearán las siguientes abreviaturas para referirse a los TBC: B (*blanco*), N (*negro*), R (*rojo*), V (*verde*), Am (*amarillo*), Az (*azul*), Mar (*marrón*), Ros (*rosa*), Nar (*naranja*), Mor (*morado*), y Gri (*gris*). La Tabla 6.5.1 muestra las conexiones existentes en protanopes que no se dieron en tricrómatas normales: 7 protanopes mostraron alguna conexión entre *rosa* y *gris*, 6 entre *verde* y *naranja*, 5 entre *verde* y *marrón*, 5 entre *amarillo* y *naranja*, 3 entre *azul* y *rosa*, 3 entre *rojo* y *marrón*, 2 entre *negro* y *rojo* y 1 entre *rojo* y *verde*. La Tabla 6.5.2 muestra las conexiones existentes en deuteranopes que no se dieron en tricrómatas normales: 8 deuteranopes mostraron alguna conexión entre *rosa* y *gris*, 8 entre *verde* y *marrón*, 5 entre *rojo* y *marrón*, 3 entre *verde* y *rosa*, 2 entre *verde* y *morado* y 2 entre *amarillo* y *naranja*, 1 entre *azul* y *rosa*, 1 entre *rojo* y *verde* y 1 entre *amarillo* y *morado*. En ambas tablas, se muestra mediante asteriscos las conexiones encontradas en los dicrómatas estudiados y que no se dieron en tricrómatas normales, en la investigación de Montag y Boynton (1994) comentada en el apartado anterior: *verde-marrón*, *verde-naranja*, y *azul-rosa*. Como puede verse, la única de estas conexiones que no se ha encontrado en la investigación actual (a nivel individual) es la conexión entre *verde* y *naranja* en deuteranopes (las Tablas 6.3.2 y 6.3.3 muestran que a nivel grupal sí que se detecta esta conexión).

Tabla 6.2.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores tricrómatas normales, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores. Nótese cómo cada fila suma 100, de manera que la casilla correspondiente a la diagonal principal indica el porcentaje de ocasiones en las que una CCB se empleó de forma aislada en la tarea de mapping, y el resto de casillas de la fila indica junto con qué otras CCB fue empleada. Por ejemplo, en tricrómatas normales *rojo* se empleó un 83,26% de las veces para seleccionar estímulos que no fueron seleccionados bajo ninguna otra CCB, un 5,87% para seleccionar estímulos que también fueron seleccionados bajo la CCB *rosa*, un 6,04% para seleccionar estímulos también seleccionados como *naranjas*, y un 4,83% para seleccionar estímulos también seleccionados como *morados*.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	75,62			2,33	3,49	2,33		4,59			11,64
N		88,89		2,22		3,33	1,11			1,11	3,33
R			83,26					5,87	6,04	4,83	
V	1,03	1,03		89,69	4,12	1,55					2,58
Am	2,73			7,27	85,45		4,55				
Az	2,20	3,30		3,30		86,81				2,20	2,20
Mar		0,48			2,40		93,27		1,92		1,92
Ros	3,23		4,92					76,33	1,64	13,88	
Nar			6,37				4,12	2,06	87,45		
Mor		0,53	2,63			1,06		9,02		85,70	1,06
Gri	6,45	1,94		3,23		1,29	2,58			1,29	83,23

Tabla 6.2.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores protanopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.2.1 pero para protanopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	70,71				6,06	1,35		19,16			2,73
N		67,04	6,48	1,67		3,33	13,15	1,67		6,67	
R		4,45	53,26	11,23			19,56	1,14	8,07	2,29	
V		0,52	5,11	45,40	3,15	2,65	20,16	5,13	7,66		10,23
Am	6,56			9,95	61,82			4,92	16,74		
Az	0,86	1,93		4,92		48,46		12,82		25,13	5,88
Mar		4,87	10,56	23,92			51,97		5,59		3,09
Ros	5,89	0,47	0,47	4,59	1,40	6,17		53,26		9,43	18,32
Nar			6,43	13,41	9,30		8,25		62,61		
Mor		3,55	1,77			23,05		17,96		52,78	0,89
Gri	1,03			11,21		3,47	2,85	22,42		0,57	58,46

Tabla 6.2.3. Conexiones existentes entre CCB en observadores deuteranopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.2.1 pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	82,65				3,03			2,50			11,82
N		45,45		16,14		6,32	17,61			8,18	6,29
R			62,60	4,43			12,47	3,13	8,54	7,78	1,04
V		3,70	1,31	43,47	2,87	2,53	21,03	4,75	1,46	4,75	14,14
Am	3,13			14,49	58,39		8,81		12,06	1,56	1,56
Az		4,93		8,59		51,70	4,74	5,53		17,58	6,92
Mar		5,06	4,62	26,35	2,18	1,75	45,23	1,66	1,83	4,21	7,11
Ros	0,72		1,31	6,72		2,30	1,88	50,21	0,44	11,19	25,23
Nar			10,52	6,07	9,94		6,07	1,29	61,28	4,83	
Mor		3,66	4,49	9,27	0,60	10,08	6,55	15,41	2,26	37,55	10,11
Gri	2,87	1,72	0,37	16,83	0,37	2,42	6,75	21,21		6,17	41,30

Tabla 6.3.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores tricrómatas normales, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B a los resultados de la tarea de mapa de colores. Nótese cómo cada fila suma más de 100. La casilla correspondiente a la diagonal principal siempre es igual a 100, puesto que indica el hecho obvio de que una CCB siempre se usa conjuntamente consigo misma (de hecho, el máximo posible es 100 en cada una de las casillas de las tablas). El resto de casillas de la fila indica la proporción del uso total de otras CCB que fue simultaneado con la CCB de interés. Por ejemplo, en tricrómatas normales, *rojo* se empleó junto con *rosa* el 6,44% de las veces que se empleó *rosa*, junto con *naranja* el 7,28% de las veces que se empleó *naranja*, y junto con *morado* el 3,07% de las veces que se empleó *morado*.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	100			1,15	3,19	2,53		4,23			7,75
N		100		1,15		3,80	0,52			0,62	2,33
R			100					6,44	7,28	3,07	
V	3,08	2,50		100	8,51	3,80					3,88
Am	4,62			4,60	100		2,58				
Az	3,08	3,75		1,72		100				1,24	1,55
Mar		1,25			5,32		100		4,72		3,10
Ros	6,06		7,05					100	2,36	10,52	
Nar			7,26				2,06	2,15	100		
Mor		1,25	5,80			2,53		18,19		100	1,55
Gri	15,40	3,75		2,87		2,53	2,06			1,24	100

Tabla 6.3.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores protanopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.3.1 pero para protanopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	100				10,62	1,77		11,05			1,75
N		100	8,35	1,15		3,99	9,37	0,87		6,72	
R		9,67	100	11,25			20,31	0,87	10,28	3,36	
V		2,49	21,08	100	16,09	10,15	46,03	8,63	21,42		19,17
Am	8,57			6,95	100			2,62	14,85		
Az	1,90	4,97		5,83		100		11,59		43,67	5,93
Mar		19,61	36,73	44,41			100		13,18		4,87
Ros	27,10	2,49	2,15	11,30	7,96	26,45		100		34,03	38,36
Nar			15,16	16,86	27,08		10,75		100		
Mor		9,94	4,29			51,86		17,71		100	0,97
Gri	3,86			22,53		12,14	5,94	34,40		1,68	100

Tabla 6.3.3. Conexiones existentes entre CCB en observadores deuteranopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.3.1 pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	100				5,35			1,44			6,95
N		100		8,51		9,54	11,19			9,75	4,16
R			100	3,01			10,22	2,61	17,17	11,96	0,89
V		35,50	7,07	100	24,81	16,62	58,27	13,39	9,91	24,69	40,75
Am	3,67			6,59	100		4,83		16,22	1,61	0,89
Az		13,91		5,81		100	3,86	4,58		26,85	5,86
Mar		38,74	19,92	48,37	15,08	9,17	100	3,73	9,91	17,45	16,35
Ros	3,02		5,01	10,92		10,70	3,67	100	2,10	41,05	51,35
Nar			13,64	3,35	20,65		4,04	0,87	100	6,02	
Mor		18,00	12,44	10,93	2,68	34,01	9,30	22,28	7,88	100	14,93
Gri	14,30	13,85	1,67	32,54	2,68	13,38	15,72	50,25		26,92	100

Tabla 6.4.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores tricrómatas normales, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C a los resultados de la tarea de mapa de colores. Cada celda de la matriz de frecuencias de confusión indica el número de observadores que mostraron las conexiones indicadas. Por ejemplo, de los 15 TN, 3 seleccionaron al menos un estímulo como perteneciente a la categoría de *rojo* y también a la de *rosa*. Nótese que la matriz es simétrica y la diagonal contiene el número máximo de conexiones posibles, que naturalmente coincide con el número de observadores que conformaron el grupo de tricrómatas normales.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	15				1			2			2
N		15				1					1
R			15					3	2	1	
V				15	1						2
Am					15		3				
Az						15				1	1
Mar							15		2		
Ros								15		2	
Nar									15		
Mor										15	
Gri											15

Tabla 6.4.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores protanopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.4.1 pero para protanopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	8				2	1		3			1
N		8	2	1			3			1	
R			8	1			3		3		
V				8	5		5		6		5
Am					8				5		
Az						8		3		7	1
Mar							8		5		1
Ros								8		4	7
Nar									8		
Mor										8	1
Gri											8

Tabla 6.4.3. Conexiones existentes entre CCB en observadores deuteranopes, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.4.1 pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	9				1			2			3
N		9		5		1	6			2	2
R			9	1			5	1	5	3	
V				9	2	3	8	3		2	6
Am					9		1		2	1	
Az						9		1		2	2
Mar							9		1		2
Ros								9		4	8
Nar									9	1	
Mor										9	3
Gri											9

Tabla 6.5.1. Conexiones entre CCB existentes en observadores protanopes que no se dieron en tricrómatas normales. Esta matriz se ha construido a partir de la comparación de las matrices grupales contenidas en las Tablas 6.2.1 y 6.2.2, y uniendo esta información a la aportada por la Tabla 6.4.2. Cada celda indica el número de protanopes que mostró conexiones que no se dieron en el grupo de tricrómatas normales. Los ceros muestran por tanto conexiones que sólo se dieron en la matriz grupal, pero que no se dieron en ningún observador individual. Los asteriscos indican conexiones encontradas por Montag y Boynton (1987), en los 4 dicrómatas estudiados (2 P y 2 D), pero que no se encontraron en TN.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B											
N			2					0			
R				1			3				
V							5*	0	6*		
Am								0	5		
Az								3*			
Mar											
Ros											7
Nar											
Mor											
Gri											

Tabla 6.5.2. Conexiones entre CCB existentes en observadores deuteranopes que no se dieron en tricrómatas normales. Esta matriz se ha construido a partir de la comparación de las matrices grupales contenidas en las Tablas 6.2.1 y 6.2.3, y uniendo esta información a la aportada por la Tabla 6.4.3. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.5.1 pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B											
N											
R				1			5				0
V							8*	3	0*	2	
Am									2	1	0
Az							0	1*			
Mar								0		0	
Ros											8
Nar										1	
Mor											
Gri											

Las matrices obtenidas a nivel grupal mostradas en las Tablas 6.2.1-6.2.3, 6.3.1-6.3.3 y 6.4.1-6.4.3, se emplearon como matrices de entrada (concretamente como matrices de similaridad) en diversos análisis de escalamiento multidimensional **no métrico**² (Martínez Arias, 1999; Real Deus, 2001), forzando una solución de **dos dimensiones** (se aplicó una transformación ordinal de las proximidades, conservando los empates, sin restricciones a la solución, con una configuración inicial simplex, y empleando como criterio de convergencia del stress 0,0001 para finalizar el proceso de iteraciones).

² Los análisis de MDS se realizaron empleando el algoritmo Proxscal (DTSS, Faculty of Social and Behavioral Sciences, Leiden University, The Netherlands) implementado en el software SPSS v 15.0.

A no ser que se especifique lo contrario, no se aplicó ninguna de las posibles transformaciones (rotaciones, traslaciones, escalamientos ni reflexiones) a las soluciones obtenidas. La Tabla 6.6 muestra el valor del stress bruto normalizado (una medida del mal ajuste) para cada una de las soluciones encontradas. Como puede observarse, en todos los análisis el valor fue menor que 0,05, (complementariamente el valor de la dispersión explicada, calculada como $1 - \text{stress bruto normalizado}$, fue mayor que 0,95) indicando el ajuste satisfactorio de las soluciones obtenidas.

Tabla 6.6. Stress bruto normalizado obtenido en las soluciones de diferentes análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.2.1-6.2.3 (Estrategia A), 6.3.1-6.3.3 (Estrategia B) y 6.4.1-6.4.3 (Estrategia C). TN: tricrómatas normales, P: protanopes, D: deuteranopes.

Estrategia	TN	P	D
A	,03785	,02330	,02820
B	,03705	,02336	,02736
C	,04730	,02456	,04311

La Figura 6.3 muestra la representación gráfica de las coordenadas de las CCB (véanse las Tablas 6.7.1-6.7.3) obtenidas en las soluciones derivadas de aplicar las estrategias A, B y C para tricrómatas normales (primera columna, Figuras 6.3-A1, B1 y C1), protanopes (segunda columna, Figuras 6.3-A2, B2 y C2) y deuteranopes (tercera columna, Figuras 6.3-A3, B3 y C3). Nótese la gran similitud existente entre las soluciones obtenidas a partir de las estrategias A y B para cada uno de los grupos, a pesar de que a primera vista la comparación de las matrices correspondientes pudiera inducir dudas al respecto, como puede apreciarse tras comparar las matrices de confusión de las Tablas 6.2.1-6.2.3 con las contenidas en las Tablas 6.3.1- 6.3.3.

Tabla 6.7.1. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales de los análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.2.1-6.2.3 (Estrategia A). TN: tricrómatas normales, P: protanopes, D: deuteranopes. D1: dimensión 1, D2: dimensión 2.

	TN		P		D	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
B	-,217	,197	,323	,770	-,158	,971
N	-,639	-,424	-,030	-,706	-,417	-,644
R	,726	-,224	-,482	-,437	,638	-,526
V	-,625	,244	-,317	,057	,068	-,053
Am	-,222	,712	-,308	,725	,557	,546
Az	-,371	-,508	,660	-,220	-,649	-,253
Mar	,277	,704	-,565	-,289	,236	-,148
Ros	,500	-,332	,381	,170	-,542	,294
Nar	,706	,278	-,746	,220	,804	,004
Mor	,289	-,620	,542	-,494	-,102	-,407
Gri	-,425	-,028	,541	,205	-,435	,216

Tabla 6.7.2. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales de los análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.3.1-6.3.3 (Estrategia B). TN: tricrómatas normales, P: protanopes, D: deuteranopes. D1: dimensión 1, D2: dimensión 2.

	TN		P		D	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
B	-,225	,210	,318	,772	,054	,991
N	-,645	-,419	-,017	-,709	-,456	-,598
R	,712	-,212	-,477	-,443	,565	-,589
V	-,637	,230	-,322	,046	,057	-,077
Am	-,208	,729	-,321	,721	,621	,436
Az	-,370	-,501	,663	-,211	-,717	-,175
Mar	,286	,701	-,562	-,299	,161	-,255
Ros	,517	-,332	,380	,173	-,514	,392
Nar	,714	,241	-,746	,218	,801	-,118
Mor	,273	-,624	,553	-,481	-,202	-,295
Gri	-,415	-,024	,530	,212	-,373	,289

Tabla 6.7.3. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales de los análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes mostradas en las Tablas 6.4.1-6.4.3 (Estrategia C). TN: tricrómatas normales, P: protanopes, D: deuteranopes. D1: dimensión 1, D2: dimensión 2.

	TN		P		D	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
B	,008	,190	,470	-,576	-,145	,881
N	,763	,005	-,278	,673	-,216	-,666
R	-,386	-,562	-,689	,320	,613	-,298
V	,192	,732	-,427	-,185	-,194	-,306
Am	-,285	,590	-,229	-,748	,537	,531
Az	,603	-,295	,704	,232	-,756	-,256
Mar	-,634	,381	-,465	,235	,283	-,558
Ros	-,161	-,535	,658	-,089	-,441	,418
Nar	-,738	-,112	-,618	-,309	,821	,029
Mor	,130	-,676	,519	,500	-,021	,119
Gri	,508	,283	,356	-,052	-,481	,105

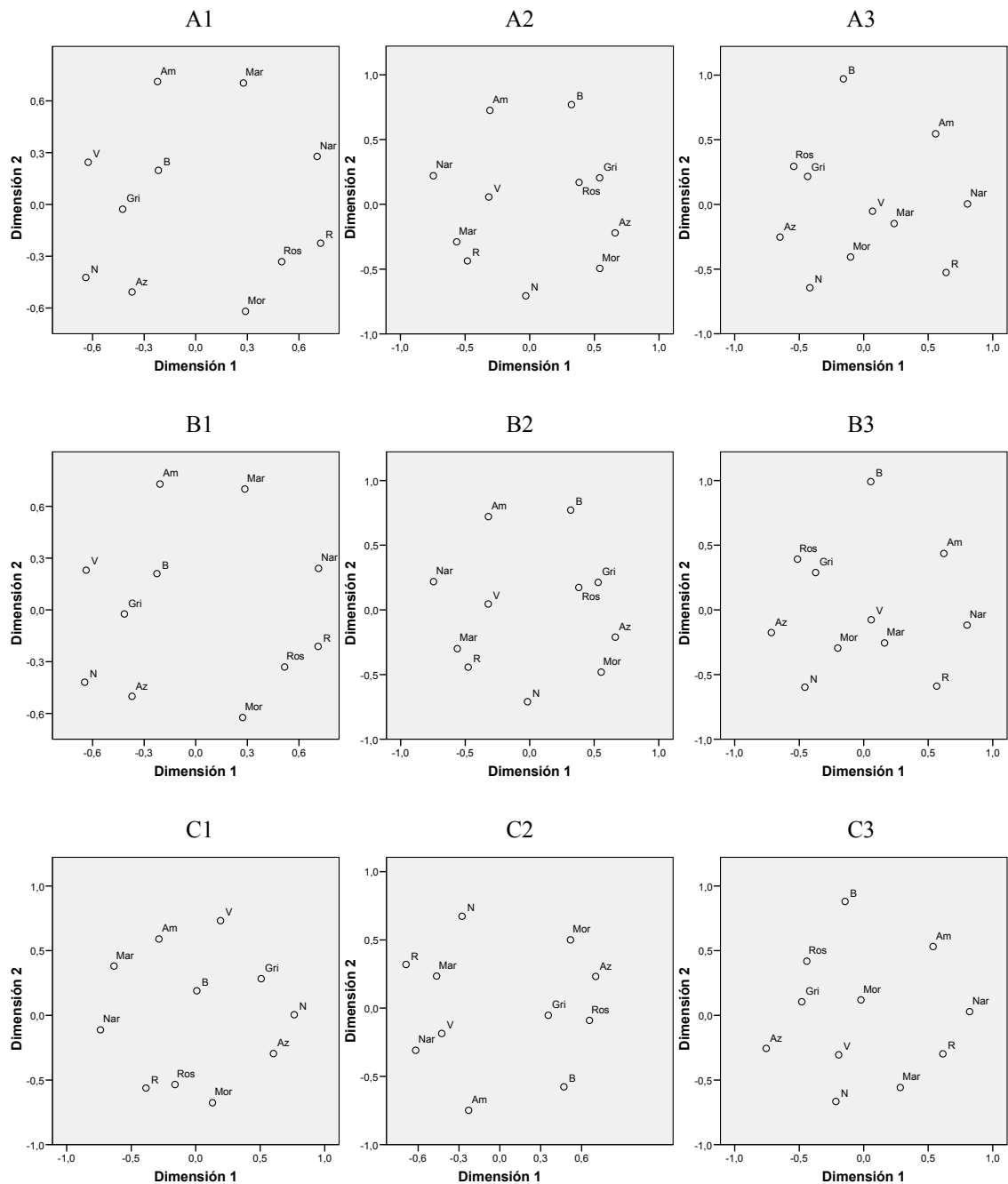


Figura 6.3. Representación bidimensional de las 11 CCB en tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes, realizada a partir de los resultados obtenidos en diferentes análisis MDS. En los análisis se emplearon como matrices de entrada las matrices grupales con información sobre las conexiones entre categorías derivadas de aplicar las estrategias A, B y C descritas en el texto. Cada columna resume los resultados de un grupo de observadores: tricrómatas normales (primera columna), protanopes (segunda columna) y deuteranopes (tercera columna). Cada fila se refiere a una estrategia diferente: A (primera fila), B (segunda fila), y C (tercera fila). Nótese que, tanto para protanopes como para deuteranopes, D1 es claramente una dimensión cromática, mientras que D2 es claramente acromática, como contraposición a lo que ocurre en la solución del MDS aplicado a tricrómatas normales, donde se obtienen dos dimensiones claramente cromáticas.

En consonancia con la literatura especializada (consúltense por ejemplo los trabajos de Paramei citados en el apartado 1.4.1.2), y por razones de brevedad, denominaremos a estas figuras “representaciones bidimensionales del espacio de color”. La comparación entre los espacios de color bidimensionales obtenidos para los diferentes grupos revela las grandes diferencias que existen entre, por un lado, los tricrómatas normales, y los observadores dicrómatas por otro. La más importante es que, mientras que el espacio de color obtenido a partir de las conexiones entre categorías mostradas por tricrómatas normales revela claramente dos dimensiones cromáticas, el espacio de color de observadores dicrómatas muestra una dimensión claramente cromática, y otra que es claramente acromática.

A continuación se comentarán estos aspectos con más detalle. Comenzaremos por los observadores tricrómatas normales. La Tabla 6.8.1 muestra las correlaciones obtenidas entre las dimensiones de las soluciones obtenidas a partir de las diferentes estrategias A, B y C. Como puede apreciarse, bien comparando visualmente las Figuras 6.3A1 y 6.3B1, bien consultando las altísimas correlaciones existentes entre las dimensiones correspondientes en la Tabla 6.8.1, la aplicación de las estrategias A y B da como resultado una solución virtualmente idéntica en los análisis MDS. Sin embargo, si se compara la Figura 6.3C1 con las Figuras 6.3A1 ó 6.3B1, a primera vista podría concluirse que las soluciones obtenidas son muy diferentes. De forma acorde, la Tabla 6.8.1 muestra unas correlaciones más bajas que en el primer caso. Volveremos sobre este aspecto enseguida. Pero antes vamos a comentar las características más destacables de la solución para TN, independientemente de la estrategia empleada para derivar la fuerza de las conexiones entre categorías:

- Las dos dimensiones del espacio de color obtenido para tricrómatas normales pueden describirse claramente como cromáticas, asemejándose con mucho a los clásicos mecanismos *rojo-verde* y *amarillo-azul*. Concretamente, como puede observarse en las Figuras 6.3A1 y 6.3B1, la dimensión 1 podría etiquetarse como mecanismo *rojo-verde*, situándose ambas categorías en los extremos de dicha dimensión. A su vez, la las categorías de *amarillo* y *azul* se sitúan en los extremos de la dimensión 2.
- Tal y como expresaran Boynton y Scheibner (1967, p. 219-220), y ya se ha citado en el apartado 1.4.2.1, esta representación recuerda el famoso círculo cromático, con la importante extensión que supone el acomodar dentro del

mismo al resto de CCB no existentes cuando se presentan únicamente estímulos monocromáticos no relacionados. A modo de ejemplo, obsérvese cómo *marrón* queda situado entre *amarillo* y *naranja*, como reflejo del hecho de que muestra conexiones con ambas categorías, como puede constatarse en las Tablas 6.2.1, 6.3.1 y 6.4.1.

- Las categorías acromáticas *blanco*, *negro* y *gris* no aparecen representadas como cabría esperar a partir de la descripción dada para las dos dimensiones. Es decir, si estas se etiquetan como *rojo-verde* y *amarillo-azul*, sería de esperar que las tres categorías acromáticas se situasen cerca del origen de coordenadas. Esto sucede aproximadamente para *blanco*, y en menor medida para *gris*, pero *negro* se aleja de este patrón, situándose de hecho muy cerca de *azul*. Hasta cierto punto, esta es una distorsión lógica, explicable si se tienen en cuenta los hechos siguientes: 1) se ha forzado una solución bidimensional, 2) para tricrómatas normales, las dos dimensiones principales en torno a las cuales se ordenan las categorías resultan ser los mecanismos cromáticos, y 3) sin embargo, *blanco* y *negro* nunca pueden aparecer próximas en la solución del MDS, por la sencilla razón de que no existe conexión entre ellas. En otras palabras, acomodar las 11 CCB en un plano cromático es artificial, y no puede lograrse sin distorsiones. Si se fuerza una solución de tres dimensiones para los tricrómatas normales, se mantienen las dos dimensiones cromáticas etiquetables como *rojo-verde* y *amarillo-azul*, pero aparece con nitidez una tercera dimensión acromática, que puede describirse como claridad, con *blanco*, *rosa* y *amarillo* situados en un extremo, y *negro* y *marrón* en el otro. Este modelo tridimensional tiene un valor de stress bruto normalizado mucho más reducido que el que se obtiene en la solución bidimensional (0,01173 para la estrategia A, 0,01181 para la estrategia B; y 0,01505 para la C), pero en la Figura 6.3 se muestra únicamente la solución bidimensional, con el objeto de comparar las soluciones obtenidas en los tres grupos de observadores. A modo de ejemplo, en la Figura 6.4 se representan tanto en tres dimensiones (Figura 6.4A) como en diferentes planos (Figuras 6.4B, 6.4C y 6.4D) las coordenadas de las categorías obtenidas en la solución tridimensional obtenida a partir de la matriz correspondiente a la estrategia A (la Tabla 6.9 muestra las coordenadas correspondientes). Nótese cómo ahora las categorías acromáticas aparecen mucho más próximas entre sí en la representación bidimensional de las dos dimensiones cromáticas (Figura 6.4B),

y cómo se distancian a lo largo de la tercera dimensión (Figuras 6.4A y 6.4C ó 6.4D), donde también se aprecia un claro distanciamiento entre *negro* y *azul* que no era evidente en la solución bidimensional (Figuras 6.3A1, 6.3B1 y 6.3C1). La Tabla 6.10 muestra las correlaciones entre las dimensiones obtenidas a partir de los modelos bidimensional y tridimensional (siguiendo la estrategia A). Es muy destacable la bajísima correlación (próxima a 0) entre la tercera dimensión del modelo 3D y las dos dimensiones del modelo 2D, lo que refuerza la interpretación de que el modelo 2D en tricrómatas normales da como resultado dos dimensiones claramente cromáticas. La Tabla 6.11 muestra las correlaciones entre las tres dimensiones obtenidas a partir de las estrategias A, B y C, y en ella pueden observarse las altísimas correlaciones (mayores que 0,9 en términos absolutos en todos los casos) entre las dimensiones correspondientes obtenidas en las diferentes soluciones, reforzando la idea de que las soluciones obtenidas en los análisis MDS parecen bastante robustas y no están influidas por la estrategia concreta seguida para cuantificar la fuerza de las conexiones (A, B ó C).

Sin embargo, tal y como se comentó anteriormente, y como puede observarse comparando la Figura 6.3C1 con las Figuras 6.3A1 y 6.3B1, parece que la estrategia C da como resultado una solución bidimensional bastante diferente de la obtenida a partir de las estrategias A y B en tricrómatas normales. Sin embargo, una observación más cuidadosa tanto de las figuras mencionadas como de la Tabla 6.8.1, permite constatar lo siguiente:

- 1) Existe una correlación alta y negativa entre la dimensión 1 de la solución obtenida a partir de la estrategia C y la dimensión 1 obtenida a partir de las otras dos estrategias.
- 2) La localización relativa de las diferentes categorías es muy similar en las soluciones A y B por un lado, y C por otro. Por ejemplo, comenzando por *amarillo*, y yendo en el sentido de las agujas del reloj, en la representación bidimensional de las soluciones de las estrategias A y B pasamos por *marrón*, *naranja*, *rojo*, *rosa*, *morado*, *azul*, *negro* y *verde*. Comenzando por *amarillo* en la representación bidimensional de la solución obtenida a partir de la estrategia C, ocurre exactamente lo mismo, si el recorrido lo hacemos en el sentido inverso al de las agujas del reloj.

En otras palabras, la localización relativa de las diferentes categorías, y por tanto las distancias entre ellas, se mantiene prácticamente invariable, independientemente de la estrategia empleada. Como prueba de ello, se sometió a la solución bidimensional obtenida a partir de la estrategia C a las siguientes transformaciones:

- 1) Se reflejó la dimensión 1. El resultado puede visualizarse en la Figura 6.5B.
- 2) Se rotó $38,4^\circ$ hacia la izquierda la representación obtenida. El resultado se muestra en la Figura 6.5C. (Para efectuar la rotación, en primer lugar se transformaron las coordenadas vectoriales a coordenadas polares, y a continuación se manipuló la fase de todos los elementos añadiéndole una cantidad constante, k . El valor de $k = 38,4^\circ$ se determinó maximizando la correlación entre la primera dimensión de la solución obtenida a partir de la estrategia A y la primera dimensión de la solución sometida a la rotación descrita).

El resultado de estas transformaciones, absolutamente legítimas en las salidas del MDS, da lugar a espacios de color virtualmente idénticos, y correlaciones cercanas a uno entre las dimensiones correspondientes, como puede observarse comparando las Figuras 6.5C y 6.5D, y viendo la Tabla 6.8.4.

Como contraposición a los resultados encontrados para tricrómatas normales, los espacios de color bidimensionales reconstruidos para dicrómatas a partir de las matrices de confusión que informan sobre las conexiones entre categorías, arrojan una primera dimensión claramente cromática tanto en protanopes como en deuteranopes (Figuras 6.3-A2, B2, C2 y 1-A3, B3, C3), con *azul* y *naranja* situados en sus extremos, mientras que la dimensión 2 es claramente acromática, siendo *blanco* y *negro* las categorías localizadas en sus extremos. Este resultado indica que para los observadores dicrómatas la dimensión acromática (claridad) cobra mucha más importancia a la hora de diferenciar entre categorías de la que tiene para los tricrómatas normales, algo bastante lógico y en sintonía con otros resultados obtenidos previamente (véase por ejemplo Pramei, Bimler y Cavonius, 1998, que interpretaron las dos dimensiones de su MDS en protanopes como brillo y *rojo-azul*).

Tabla 6.8.1. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de tricrómatas normales. A, B, C: Estrategia empleada para derivar las matrices de similitud a partir de la información sobre conexiones entre categorías.

		Dimensión 1			Dimensión 2		
		A	B	C	A	B	C
Dimensión 1	A	1	1,00	-,79	,00	-,01	-,60
	B		1	-,79	,01	,00	-,60
	C			1	-,60	-,59	,00
Dimensión 2	A				1	1,00	,78
	B					1	,78
	C						1

Tabla 6.8.2. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de protanopes. A, B, C: Estrategia empleada para derivar las matrices de similitud a partir de la información sobre conexiones entre categorías.

		Dimensión 1			Dimensión 2		
		A	B	C	A	B	C
Dimensión 1	A	1	1,00	,95	,00	,01	,17
	B		1	,95	-,01	,00	,19
	C			1	,17	,18	,00
Dimensión 2	A				1	1,00	-,98
	B					1	-,97
	C						1

Tabla 6.8.3. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de deuteranopes. A, B, C: Estrategia empleada para derivar las matrices de similitud a partir de la información sobre conexiones entre categorías.

		Dimensión 1			Dimensión 2		
		A	B	C	A	B	C
Dimensión 1	A	1	,98	,97	,00	-,16	,00
	B		1	,95	,16	,00	,14
	C			1	-,04	-,19	,00
Dimensión 2	A				1	,98	,87
	B					1	,89
	C						1

Tabla 6.8.4. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de tricrómatas normales. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.8.1, pero después de transformar las coordenadas obtenidas en el análisis MDS aplicado a la matriz de similitud a partir de la estrategia C (concretamente, después de reflejar D1 y rotar las coordenadas 38,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj, consúltase el texto).

TN		Dimensión 1			Dimensión 2		
		A	B	C	A	B	C
Dimensión 1	A	1	1,00	,99	,00	-,01	,03
	B		1	,99	,01	,00	,04
	C			1	,00	,00	,03
Dimensión 2	A				1	1,00	,98
	B					1	,98
	C						1

Tabla 6.9. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en la solución tridimensional del análisis MDS no métrico aplicado a la matriz grupal de tricrómatas normales mostrada en la Tabla 6.2.1 (Estrategia A). D1: dimensión 1, D2: dimensión 2, D3: dimensión 3.

	D1	D2	D3
B	,222	,046	-,540
N	,231	-,403	,553
R	-,730	-,033	,004
V	,603	,063	-,233
Am	,286	,619	-,263
Az	,325	-,531	-,054
Mar	,063	,524	,467
Ros	-,516	-,032	-,410
Nar	-,540	,385	,298
Mor	-,388	-,551	-,085
Gri	,444	-,087	,261

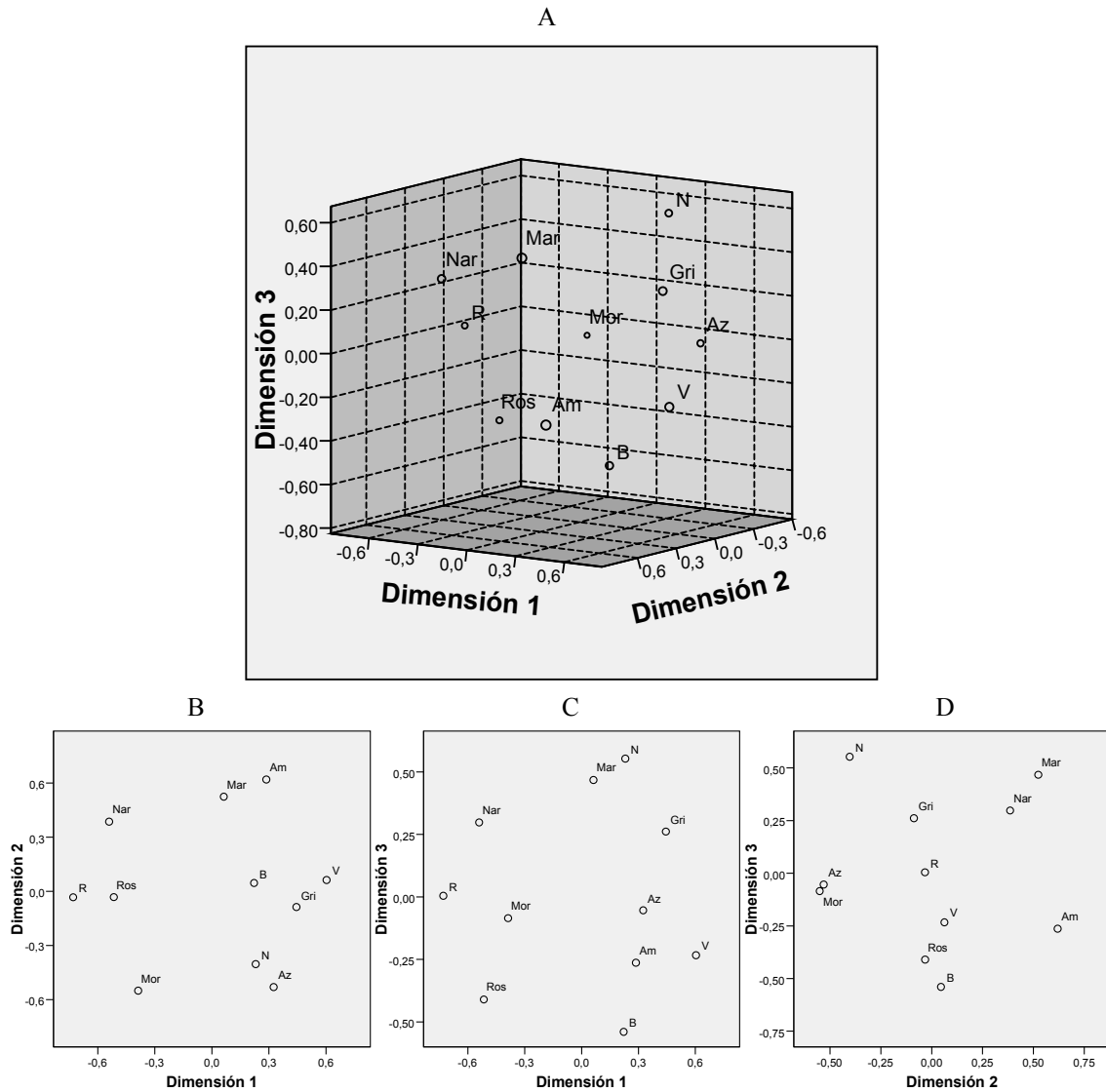


Figura 6.4. Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS tridimensional aplicado a tricrómatas normales. Se muestra una representación tridimensional (A) y los planos resultantes de combinar las diferentes dimensiones (B-D). En los análisis se empleó como matriz de entrada la matriz grupal con información sobre las conexiones entre categorías derivadas de aplicar la estrategia A descrita en el texto. Nótese que las dos primeras dimensiones son claramente cromáticas, mientras que la tercera es claramente acromática.

Tabla 6.10. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensional y tridimensional de los análisis MDS realizados a partir de la matriz grupal de tricrómatas normales (Estrategia A).

		Solución 2D	
		D1	D2
Solución 3D	D1	-,938	,277
	D2	,256	,947
	D3	-,005	,021

Tabla 6.11. Correlaciones entre las dimensiones de los modelos 3D en tricrómatas normales. A, B, C: Estrategia empleada para derivar las matrices de similitud a partir de la información sobre conexiones entre categorías.

		D1			D2			D3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
D1	A	1	1,00	,918	,000	,014	,317	,000	,001	-,032
	B		1	,913	-,014	,000	,328	-,001	,000	-,033
	C			1	,324	,335	,000	,051	,049	,000
D2	A				1	1,00	-,913	,000	-,007	,048
	B					1	-,907	,007	,000	,053
	C						1	,090	,097	,000
D3	A							1	1,00	,909
	B								1	,908
	C									1

Forzando una solución tridimensional para protanopes y para deuteranopes se reduce el estrés bruto normalizado (como es lógico), pero en contra de lo que sucede para tricrómatas normales, la tercera dimensión que surge tanto en protanopes como en deuteranopes resulta muy difícil de interpretar. Por ejemplo, en protanopes (estrategia A), *amarillo* y *azul* se sitúan en el mismo extremo de la tercera dimensión. En principio, podría interpretarse dicha dimensión como saturación, pero *negro* y *blanco* no aparecen en el extremo opuesto, sino situados en los valores centrales, lo que dificulta enormemente tal interpretación. Por su parte, en deuteranopes (estrategia A), *amarillo* y *negro* aparecen en el mismo extremo de la tercera dimensión, lo que impide una interpretación de la misma en términos de claridad, de mecanismos cromáticos, o de saturación. Puesto que el estrés bruto normalizado de los modelos bidimensionales es muy pequeño tanto en protanopes como en deuteranopes (consúltese la Tabla 6.6), nos ceñiremos exclusivamente a dichos modelos para interpretar los resultados de los observadores dicrómatas.

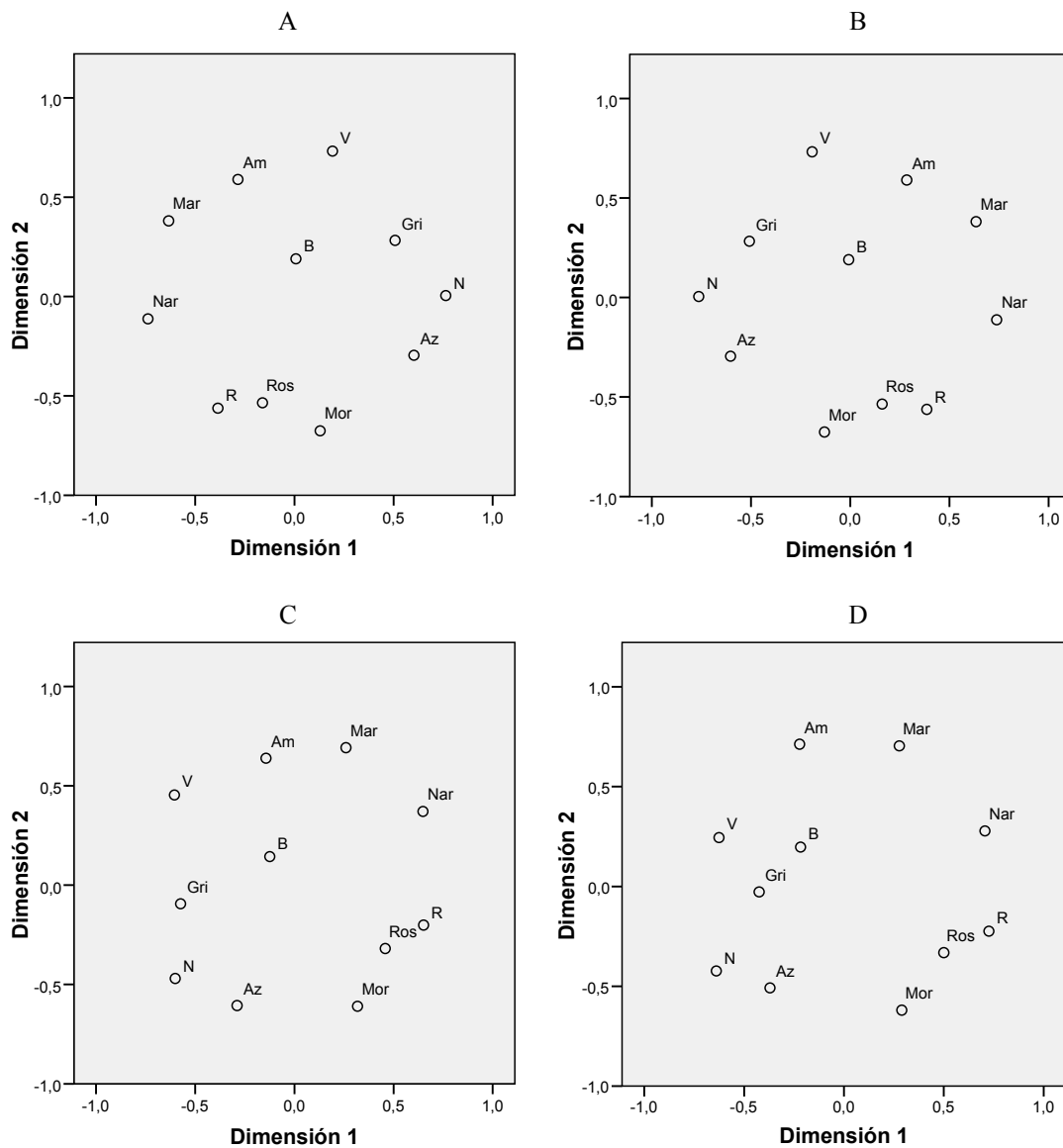


Figura 6.5. Efecto de las transformaciones (reflexión y rotación) aplicadas a la solución bidimensional del análisis MDS obtenida en tricrómatas normales a partir de la estrategia C. Se muestra la solución obtenida directamente del análisis (A: nótese que es idéntica a la Figura 6.3-C1), el efecto de reflejar la dimensión 1 (B), el efecto de la posterior rotación de 38,4° en el sentido contrario al de las agujas del reloj (C). Para facilitar la comparación, también se muestra la solución obtenida a partir de la estrategia A (D: idéntica a la Figura 6.3-A1).

En consonancia con las conexiones existentes en dicrómatas e inexistentes en tricrómatas normales (Tablas 6.5.1 y 6.5.2), puede observarse cómo en los espacios de color bidimensionales de protanopes (Figura 6.3-A2, B2 y C2) y deuteranopes (Figura 6.3-A3, B3 y C3) se sitúan muy próximas entre sí categorías como *gris* y *rosa*, o *verde* y *marrón*, o *azul* y *rosa*. Efectivamente, *marrón* deja de estar situada entre *amarillo* y *naranja*, como ocurría en la solución de tricrómatas normales, para situarse muy cerca de *verde* en ambos grupos, e interponiéndose entre esta categoría y *rojo*, también en

ambos grupos. Igualmente interesante es la observación de que las categorías de *rojo* y *rosa*, que están muy próximas en la representación de la solución de los tricrómatas normales, se encuentran enormemente alejadas en los espacios de protanopes y deuteranopes (de hecho, en ningún observador protanope, Tabla 6.4.2, y únicamente en un observador deuteranope, Tabla 6.4.3, se dio dicha conexión).

Aun existiendo enormes parecidos entre las representaciones bidimensionales de protanopes y deuteranopes, también existen algunas diferencias. Por ejemplo, *negro* y *rojo* aparecen más cercanos en el modelo de los protanopes (algo esperable en cierto modo, a partir de la eficiencia espectral reducida de los protanopes ante longitudes de onda larga), lo que ocurre igualmente para *verde* y *naranja*. Por otra parte, mientras que *marrón* y *verde* se sitúan algo más cerca en la solución de los deuteranopes que en la de los protanopes, *marrón* y *rojo* se sitúan más cerca en la solución de los protanopes.

La Tabla 6.12 resume las correlaciones entre las dimensiones del modelo tridimensional en tricrómatas normales, y los modelos bidimensionales en protanopes y deuteranopes, según las matrices derivadas de la estrategia A. Nótese la alta correlación entre las dimensiones correspondientes de los dos grupos de dicrómatas (-0,86 y 0,96), lo que confirma el parecido visual (si se refleja la primera dimensión en una cualquiera de las soluciones) entre las representaciones correspondientes (Figuras 6.3-A2 y 6.3-A3). Nótese además que la correlación más alta (cercana a 0,7 en términos absolutos) entre las dimensiones del modelo de los tricrómatas normales y los modelos de los dicrómatas se da entre la segunda dimensión del modelo de tricrómatas normales y la primera dimensión de los modelos de dicrómatas, lo que no deja lugar a dudas de la importancia del mecanismo *amarillo-azul* en este tipo de observadores. Por último, es importante comentar que la tercera de las dimensiones del modelo tricrómatas, y la segunda de las dimensiones de los modelos bidimensionales de los dicrómatas, es igualmente elevada (superior a 0,6 en términos absolutos). Anteriormente se ha indicado que todas estas dimensiones eran etiquetables como acromáticas.

Tabla 6.12. Correlaciones entre las dimensiones del modelo 3D en TN y 2D en protanopes y deuteranopes.

			TN			P		D	
			D1	D2	D3	D1	D2	D1	D2
TN	D1	1		,00	,00	,24	,25	-,39	,26
	D2			1	,00	-,73	,57	,69	,48
	D3				1	-,34	-,61	,11	-,64
P	D1					1	,00	-,86	,15
	D2						1	,18	,96
D	D1							1	,00
	D2								1

II. Frecuencia y distribución de los errores

El punto de partida para analizar la frecuencia y distribución de los errores fueron las mismas matrices de dimensiones 11 x 102 que han sido descritas en el apartado anterior (*I Conexiones entre categorías*). Para determinar los errores cometidos por los observadores dicrómatas, así como su distribución entre las diferentes categorías, se llevó a cabo el análisis descrito con detalle en el Anexo I. Tal y como se explica en dicho Anexo, se tomaron dos criterios diferentes para definir cuáles de las respuestas de los dicrómatas se consideraron como aciertos:

- *Criterio estricto (o criterio moda)*: Se consideró que la selección de un estímulo como un elemento de determinada categoría era un acierto si dicha categoría era la *moda* de la distribución de respuestas (de CCB) de los TN ante el estímulo considerado.
- *Criterio laxo*: Se consideró que la selección de un estímulo como un elemento de una determinada categoría era un acierto *si al menos un* TN seleccionó el estímulo considerado como perteneciente a dicha categoría.

Con el objetivo de hacer la exposición lo más clara posible, y a no ser que se indique lo contrario, a continuación se describen exclusivamente los resultados obtenidos mediante la aplicación del criterio estricto. No obstante, en el Anexo I se aportan resultados obtenidos aplicando el criterio laxo (como se comentará más tarde, los resultados no se vieron afectados en lo fundamental por la elección de uno u otro criterio).

Las Tablas 6.13.1 (protanopes) y 6.13.2 (deuteranopes) muestran los resultados obtenidos. Cada fila resume la naturaleza de las respuestas de los observadores dicrómatas en la tarea de mapa de colores cuando debían señalar todos aquellos estímulos pertenecientes a la categoría correspondiente. Más específicamente, del total de estímulos seleccionados, se detalla el porcentaje de aciertos (en la casilla situada en la diagonal principal de la matriz), así como la distribución del porcentaje de errores cometidos entre las otras categorías (el sumatorio de cada fila es igual a 100). Para facilitar la lectura de las tablas, se han eliminado los porcentajes inferiores al 3%. Para cada fila, la última columna indica el sumatorio de las celdillas que no superaron este porcentaje.

Tabla 6.13.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Nótese cómo cada fila suma 100, de manera que la casilla correspondiente a la diagonal principal indica el porcentaje de aciertos, y el resto de casillas de la fila indica la naturaleza de los errores cometidos. Por ejemplo, en protanopes hubo un 58% de aciertos al emplear la categoría *rojo*, y por tanto un 42% de errores, distribuidos fundamentalmente entre las categorías de *marrón* (28,82%), y *naranja* (7,82%).

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	67,31			6,54				22,88			3,27	0,00
N		88,10	3,81			5,71						2,39
R			58,00				28,82		7,82			5,37
V				46,00	8,24		36,85				5,77	3,12
Am				23,86	75,00							1,14
Az				3,88		60,00		5,67		26,85	3,04	0,56
Mar		5,94	3,37	22,23			63,16		4,49			0,80
Ros	7,23			3,42				41,60		23,91	20,10	3,75
Nar				6,42	26,35		13,41		51,22			2,61
Mor			3,15			33,71		5,51		56,06		1,57
Gri				23,69			4,41	12,18		4,89	51,75	3,07

Tabla 6.13.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores deuteranopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.13.1, pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	70,69				3,01			26,30				0,00
N		86,00		3,96		7,13						2,90
R			70,77				11,13		14,88			3,22
V		8,61		38,86	8,92		26,86				11,96	4,79
Am				20,10	74,36				3,47			2,08
Az				9,43		73,58				13,21		3,78
Mar		12,68	3,34	18,01	4,53		54,93					6,51
Ros				3,95				42,55		24,51	23,73	5,27
Nar					10,65				84,91			4,45
Mor		9,71	7,13	5,65		8,85			6,27	57,97		4,42
Gri	5,84	4,05		20,51			3,12	9,89		12,41	43,24	0,93

Por ejemplo, la Tabla 6.13.1 nos informa de que cuando los observadores protanopes debían seleccionar estímulos pertenecientes a la categoría *rojo* acertaron el 58% de las ocasiones (es decir, en dichas ocasiones *rojo* fue la respuesta más frecuente de la distribución de respuestas de los TN). Por lo tanto, el 42% de sus respuestas fueron errores. Más específicamente, los errores se distribuyeron sobre todo entre las categorías de *marrón* (28,82%), y *naranja* (7,82%). El resto de errores (5,37%) se repartieron entre otras categorías, como se muestra en la última columna.

Es muy importante señalar que las matrices de las Tablas 6.13.1 y 6.13.2 no son simétricas con respecto a la diagonal. Muy por el contrario, son matrices asimétricas. Por ejemplo, en la Tabla 6.13.1 puede verse que los protanopes seleccionaron un 28,82% de estímulos “*marrones*” como pertenecientes a la categoría *rojo*, mientras que únicamente seleccionaron un 3,37% de estímulos “*rojos*” como pertenecientes a la categoría *marrón*. Volveremos sobre este aspecto más tarde. Para evitar ambigüedades, y a no ser que se especifique lo contrario, cuando se hable de los errores cometidos entre dos categorías, nos referiremos al caso específico en el que, seleccionado estímulos pertenecientes a la primera de las categoría indicadas, se seleccionaron estímulos pertenecientes a la segunda (por ejemplo, si hablamos de confusiones entre *rojo* y *marrón*, nos referiremos a un 28,82%, mientras que si hablamos de confusiones entre *marrón* y *rojo*, nos referiremos a un 3,37%).

En las Figuras 6.6A y 6.6B puede visualizarse la información referente a la distribución de los errores resumida en las Tablas 6.13.1 y 6.13.2. En estas figuras, cada una de las once agrupaciones de barras representa gráficamente la distribución de los errores (en términos porcentuales con respecto al total de respuestas, y ordenados de forma descendente) para la categoría indicada a la izquierda en el eje de abscisas (resaltada con mayúsculas). Por ejemplo, el primer conjunto formado por tres barras en la Figura 6.6A indica que cuando los protanopes debían seleccionar estímulos pertenecientes a la categoría *BLANCO* seleccionaron un 22,88% de estímulos pertenecientes a la categoría *rosa*, un 6,54% de estímulos pertenecientes a la de *verde* y un 3,27% a la de *gris*.

Atendiendo exclusivamente al porcentaje de aciertos (la diagonal principal de las matrices), es destacable que en todas las categorías se superó el 50%, a excepción de *verde* (46% en protanopes y 38,86% en deuteranopes), *rosa* (41,60% en protanopes y 42,55% en deuteranopes), y *gris* (43,24% en deuteranopes). Más adelante se realizará un análisis mucho más pormenorizado sobre la distribución de aciertos, errores, y porcentaje de errores para cada categoría, y comparando entre los dos grupos de dicrómatas.



En cuanto a la naturaleza de los errores cometidos, *verde-marrón* es, de entre todas, la confusión más habitual en ambos grupos de dicrómatas (la barra más alta en las Figuras 6.6A y 6.6B). Otras confusiones comunes a ambos grupos (que generaron un porcentaje de errores superior al 10%) pueden consultarse en las dos primeras columnas de la Tabla 6.14. Además, esta tabla muestra información de interés de cara a diferenciar las confusiones más comunes producidas en protanopes y deuteranopes. Concretamente, la tercera columna muestra las confusiones entre categorías que se dieron en protanopes en al menos un 5% más de ocasiones que en deuteranopes, y la cuarta columna indica aquellas que se dieron en al menos un 5% más de ocasiones en deuteranopes. Por ejemplo, puede verse cómo los errores cometidos por los protanopes al buscar ejemplares de *verde* se concentran en la categoría *marrón*, mientras que por el contrario los errores cometidos por los deuteranopes se dispersan (además) entre otras categorías, como *negro* y *gris*.

Tabla 6.14. Errores más comunes tanto en protanopes como en deuteranopes, y diferencias en los errores cometidos por ambos grupos. A partir de las Tablas 6.13.1-6.13.2 y AI.1.1-AI.1.2. P: protanopes. D: deuteranopes.

CCB	Porcentaje de errores superior al 10% en P y D	Porcentaje de errores superior en un 5% en P vs D	Porcentaje de errores superior en un 5% en D vs P
B	Ros*	V*	
N			
R	Mar*	Mar	Nar*
V	Mar	Mar	N; Gri
Am	V	V	
Az	Mor	Ros; Mor	V*
Mar	V		N
Ros	Mor; Gri		
Nar	Am	Am; Mar	
Mor		Az	N; V; Nar
Gri	V		Mor

*: el porcentaje de los errores supera el valor indicado únicamente a partir del uso del criterio estricto para definir los aciertos.

Por último, las Tablas 6.15.1 y 6.15.2 muestran cuántos observadores protanopes y deuteranopes cometieron realmente los errores detectados a nivel grupal que aparecen resumidos en las Tablas 6.13.1 y 6.13.2, y que se representan en las Figuras 6.6A-B. Por ejemplo, como puede verse, todos los dicrómatas, sin excepción, cometieron el error *verde-marrón*. A diferencia de las Tablas 6.5.1-6.5.2, en las que se mostraba el número de observadores que realmente mostraban las conexiones entre categorías detectadas a nivel grupal, puede observarse que en las Tablas 6.15.1 y 6.15.2 no hay ceros, por la sencilla razón de todos los errores resumidos en las Tablas 6.13.1 y 6.13.2

necesariamente proceden de errores que se dieron, en mayor o menor medida, a nivel individual. En este sentido resulta muy interesante resaltar que hay errores que cometieron la mayoría de los dicrómatas, como por ejemplo el mencionado *verde-marrón*, que, como ya se ha dicho, no sólo cometieron todos los observadores, sino que además produjo el mayor porcentaje de respuestas erróneas. Como contraposición, existen errores, como por ejemplo *gris-azul* en deuteranopes, que aunque fue cometido por todos los observadores, produjo un porcentaje bajísimo de errores (0,8%, por lo que ni siquiera aparece representado en la Tabla 6.13.2 al ser $< 3\%$). La lectura de estos resultados es evidente, como podrá verse en las representaciones colorimétricas correspondientes: mientras que hubo muchos estímulos claramente seleccionados como *marrones* por los tricrómatas normales y que produjeron el error *verde-marrón*, no hubo ningún estímulo claramente categorizado como *azul* por los tricrómatas normales que produjera el error *gris-azul*: todos los estímulos que produjeron este tipo de error se encontraban en la frontera entre las categorías *verde* y *azul*, aunque su pertenencia a la categoría *verde* era mucho mayor de lo que lo era su pertenencia (residual) a la categoría *azul* (este es un ejemplo de las ventajas de analizar los errores desde el punto de vista de la lógica borrosa). Eso sí, no cabe lugar a dudas de que estos estímulos produjeron el error de forma sistemática en todos los observadores.

Para realizar un análisis global de la información contenida en las matrices de confusión de las Tablas 6.13.1 y 6.13.2, se introdujeron estas matrices como matrices de similitud en un MDS (los detalles del análisis fueron los mismos que se especificaron en el apartado anterior). Es interesante resaltar que, aunque estas matrices no informan directamente sobre las conexiones entre categorías (por ejemplo, los protanopes no cometieron el error *blanco-amarillo*, pero sí que se registró la conexión *blanco-amarillo*), las soluciones bidimensionales que se encontraron (y que no se muestran para evitar ser redundantes) fueron muy similares a las obtenidas aplicando el análisis MDS a las matrices que informan sobre las conexiones entre categorías, y que fueron largamente expuestas en el apartado anterior. Como prueba de ello, las Tablas 6.16.1 y 6.16.2 muestran las correlaciones existentes entre las dimensiones correspondientes. Además, el valor del estrés bruto normalizado de las soluciones fue muy satisfactorio: 0,02013 (criterio laxo) y 0,02132 (criterio estricto) para protanopes, y 0,02691 (criterio laxo) y 0,03141 (criterio estricto) para deuteranopes.

Tabla 6.15.1. Número de observadores protanopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores. Esta matriz se ha construido a partir de las matrices individuales que resumen los errores cometidos por cada uno de los protanopes (no mostradas por razones de espacio). Cada celdilla muestra el número de protanopes (del total de 8) que mostraron el error correspondiente.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	8			2				7			1
N		8	1			3	1	1		1	
R		2	8	1			5		1		
V		3		8	4	1	8	2	2	1	4
Am	2			6	8						
Az	1	2	1	1		8		4		6	3
Mar		4	3	7			8		2		2
Ros	5		4	3	1	4		8	2	8	7
Nar			1	6	7		7		8		
Mor		6	3			8		3		7	
Gri	4			8		8	4	6		7	8

Tabla 6.15.2. Número de observadores deuteranopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.15.1 pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	9				1			8			
N		9		1		4				1	1
R			9	1			6	2	5	2	
V		7	1	9	6	2	9	2		4	7
Am	3			5	9				1		
Az		1		4		9				3	1
Mar		7	3	8	4	1	9	3	1	3	3
Ros	7		2	3		4	1	9	3	6	8
Nar				2	3		1		9		
Mor		3	4	3		5	2	4	1	8	2
Gri	4	3	2	7		4	1	8		7	9

Se comentó anteriormente que las matrices de las Tablas 6.13.1 y 6.13.2 no son simétricas. La Tabla 6.17 recalca el hecho de que para diferentes pares de categorías los porcentajes de error no son simétricos. Es decir, ocasiones en las que cuando se buscan ejemplares pertenecientes a una categoría, se comete un porcentaje de error determinado con otra categoría, pero este porcentaje varía (a veces drásticamente) cuando lo que se buscan son ejemplares pertenecientes a la segunda categoría. Como puede observarse en la Tabla 6.17, esto sucede de forma muy clara para los errores *rojo-marrón*, *verde-amarillo*, *verde-marrón*, *verde-gris*, *amarillo-naranja*, o *rosa-morado*. Este tipo de asimetrías, que aportan un conocimiento muy interesante sobre el uso de las CCB por parte de observadores dicrómatas, volverán a examinarse a la luz de los resultados de los análisis colorimétricos del siguiente apartado.

Tabla 6.16.1. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de protanopes. C (A): se corresponde con la solución MDS obtenida a partir de la matriz de confusión que informa sobre las conexiones entre categorías siguiendo la Estrategia A (Tabla 6.2.2). E (L): Errores siguiendo el criterio laxo (Tabla AI.1.1 del Anexo I). E (E): Errores siguiendo el criterio estricto (Tabla 6.13.1).

		Dimensión 1			Dimensión 2		
		C (A)	E (L)	E (E)*	C (A)	E (L)	E (E)*
Dimensión 1	C (A)	1	,99	,99	,00	,01	-,01
	E (L)		1	1,00	-,02	,00	-,02
	E (E)*			1	-,01	,01	-,01
Dimensión 2	C (A)				1	,99	,99
	E (L)					1	1,00
	E (E)*						1

*: las coordenadas obtenidas en el análisis MDS correspondiente fueron transformadas mediante la reflexión de D1 y la rotación de las coordenadas resultantes 33,3° en el sentido de las agujas del reloj.

Tabla 6.16.2. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de deuteranopes. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.16.1 pero para deuteranopes.

		Dimensión 1			Dimensión 2		
		C (A)	E (L)	E (E)*	C (A)	E (L)	E (E)*
Dimensión 1	C (A)	1	,96	,98	,00	,22	,06
	E (L)		1	,96	-,22	,00	-,16
	E (E)*			1	,01	,23	,06
Dimensión 2	C (A)				1	,96	,96
	E (L)					1	,97
	E (E)*						1

*: las coordenadas obtenidas en el análisis MDS correspondiente fueron transformadas mediante la rotación de las coordenadas 36,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj.

Más allá del análisis grupal efectuado hasta el momento, conviene recordar que se confeccionaron 34 matrices de confusión a nivel individual. A partir de dichas matrices se han podido construir las Tablas 6.15.1-6.15.2, que como ya se ha indicado indican el número de observadores que cometieron cada uno de los errores detectados a nivel grupal. Además, las matrices individuales aportan muchísima información sobre cómo diferentes personas, aunque sean diagnosticadas dentro del mismo tipo de dicromatismo, pueden comportarse de manera muy diferente al emplear los TCB.

Para poder confrontar las respuestas individuales con las del grupo de referencia correspondiente, así como para poder establecer comparaciones entre los dos grupos de dicrómatas, se recurrió al cálculo de los tres valores siguientes (a nivel grupal e individual):

Tabla 6.17. Asimetrías más destacables detectadas en las Tablas 6.13.1-6.13.2. Se muestran aquellas asimetrías en las que la búsqueda de una de las categorías del par produjo como mínimo un 5% de errores más que la búsqueda de la otra categoría para alguno de los dos grupos. Fuera del paréntesis se muestra el porcentaje correspondiente (a partir de las Tablas 6.13.1-6.13.2), y entre paréntesis, el número de observadores que cometió el error (a partir de las Tablas 6.15.1-6.15.2).

	Protanopes		Deuteranopes	
	Buscando la 1ª categoría	Buscando la 2ª categoría	Buscando la 1ª categoría	Buscando la 2ª categoría
B-Ros	22,88 (7)	7,23 (5)	26,30 (8)	2,57 (7)
B-V	6,54 (2)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)
B-Gri	3,27 (1)	1,15 (4)	0,00 (0)	5,84 (4)
N-Az	5,71 (3)	0,28 (2)	7,13 (4)	2,92 (1)
N-Mar	1,43 (1)	5,94 (4)	0,00 (0)	12,68 (7)
N-Mor	0,48 (1)	1,47 (6)	2,64 (1)	9,71 (3)
R-Mar	28,82 (5)	3,37 (3)	11,13 (6)	3,34 (3)
R-Nar	7,82 (1)	2,61 (1)	14,88 (5)	0,00 (0)
R-Mor	0,00 (0)	3,15 (3)	0,54 (2)	7,13 (4)
V-Am	8,24 (4)	23,86 (6)	8,92 (6)	20,10 (5)
V-Az	0,16 (1)	3,88 (1)	1,55 (2)	9,43 (4)
V-Mar	36,85 (8)	22,23 (7)	26,86 (9)	18,01 (8)
V-Gri	5,77 (4)	23,69 (8)	11,96 (7)	20,51 (7)
Am-Nar	0,00 (0)	26,35 (7)	3,47 (1)	10,65 (3)
Az-Mor	26,85 (6)	33,71 (8)	13,21 (3)	8,85 (5)
Mar_Nar	4,49 (2)	13,41 (7)	0,28 (1)	1,89 (1)
Ros_Mor	23,91 (8)	5,51 (3)	24,51 (6)	2,83 (4)
Ros_Gri	20,10 (7)	12,18 (6)	23,73 (8)	9,89 (8)
Nar-Mor	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	6,27 (1)
Mor-Gri	0,00 (0)	4,89 (7)	0,98 (2)	12,41 (7)

1. *Porcentaje de aciertos.* Se obtiene simplemente a partir del número de aciertos y de errores. Por ejemplo, del total de 830 selecciones del grupo de protanopes, 466 fueron aciertos y 364 errores, lo que arroja un porcentaje de aciertos igual a 56,14%. En el caso de los deuteranopes, este fue de 55,69% (553 aciertos y 440 errores).
2. *Media del porcentaje de aciertos obtenido para las 11 CCB.* Por ejemplo: tomando la suma de las casillas de la diagonal principal de las matrices de confusión de las Tablas 6.13.1-6.13.2 y dividiendo por once, obtenemos un porcentaje medio de aciertos de 59,84% para protanopes, y de 63,44% para deuteranopes.
3. *Índice de solapamiento con el mapa de color de los tricrómatas normales.* El criterio para determinar si una respuesta es un acierto o un error, es, hasta cierto punto arbitrario, como se recalcó anteriormente. Además, la aplicación de dicho criterio conlleva la creación de una nueva variable categórica con únicamente dos valores posibles (acierto o error). Para poder expresar de forma más cuantitativa la similitud entre las distribuciones de las respuestas proporcionadas

ante los estímulos se ideó un índice de solapamiento entre mapas de colores. El objetivo fundamental de este índice de solapamiento es depurar la información aportada por los porcentajes de acierto que se han descrito en los puntos anteriores, integrando más información de la que aporta por sí sola la definición de una respuesta como acierto o como error.

Los detalles del procedimiento seguido para calcular este índice de solapamiento se describen en el Anexo II. La Tabla 6.18 muestra el índice de solapamiento entre los tres grupos de observadores.

Tabla 6.18. Solapamiento entre los mapas de color de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes, establecidos a nivel grupal. TN = tricrómatas normales, P = protanopes, D = deuteranopes. El procedimiento seguido para establecer el grado de solapamiento se explica con detalle en el Anexo II (consúltase también la Tabla AI.4).

	TN	P	D
TN	100	61,23	63,24
P		100	72,80
D			100

La Tabla 6.19 recoge y amplía la información aportada por la Tabla 6.18. En ellas se muestra: 1) el porcentaje de aciertos (columna 2), 2) la media del porcentaje de aciertos obtenido para las 11 CCB (columna 3), y 3) el índice de solapamiento con el mapa de color de los tricrómatas normales (columna 4) para protanopes y deuteranopes, tanto a nivel grupal (en negrita) como a nivel individual.

Para ejemplificar las diferencias individuales en el uso de TCB, las Tablas 6.20.1-6.20.2 muestran las matrices de confusión que resumen los aciertos y errores cometidos por dos protanopes en la tarea de mapa de colores, y las Tablas 6.21.1-6.21.2 corresponden a dos deuteranopes. Concretamente, se muestran las matrices de los observadores protanopes y de deuteranopes con mayor y menor porcentaje de aciertos, de acuerdo a la Tabla 6.19. En el título de cada tabla se especifican las iniciales del observador, así como su tipo de dicromatismo (P ó D), seguido de un número que sirve como identificación dentro de cada grupo.

Tabla 6.19. Diferentes medidas de la ejecución de protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores. En el texto se describe con detalle cada una de las tres medidas que se muestran. P = protanopes, D = Deuteranopes. Se muestran las medidas de ejecución tanto a nivel grupal (en negrita) como a nivel individual, identificando a cada individuo mediante su grupo de pertenencia (P o D), un número (de 1 a 8 en el caso de los protanopes y de 1 a 9 en el caso de los 9 deuteranopes), y sus iniciales.

	Porcentaje de aciertos	Porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB	Índice de solapamiento con TN
P	56,14	59,84	57,97
P1: LEL	49,08	54,45	55,93
P2: JPGA	61,11	66,18	67,89
P3: PAL	61,11	65,43	60,93
P4: RN	57,55	67,58	60,06
P5: DLL	53,68	68,70	53,05
P6: JMI	66,30	71,98	67,37
P7: JJMC	50,77	53,89	49,58
P8: JGL	54,26	57,67	57,62
D	55,69	63,44	58,61
D1: CTM	50,00	67,32	50,60
D2: ASC	60,00	69,92	65,20
D3: JSC	51,49	64,25	56,91
D4: AEM	65,32	73,28	73,17
D5: EGS	61,11	68,43	68,43
D6: FJR	54,96	66,29	59,42
D7: JP	49,35	59,58	56,10
D8: JT	58,06	65,90	61,31
D9: DSC	55,41	68,48	56,81

Una comparación entre las Tablas 6.13.1 y 6.20.1 permite establecer rápidamente que el observador JMI (P6) cometió bastantes menos errores que el grupo de protanopes. Concretamente, no cometió errores al seleccionar ejemplares pertenecientes a las categorías *rojo* y *amarillo* (su porcentaje de aciertos fue en ambos casos del 100%, frente al 58% y 75% del grupo de protanopes), y su porcentaje de aciertos fue mayor al seleccionar estímulos pertenecientes a las categorías *rosa* (75% vs. 41,60%), *naranja* (85,71% vs. 51,22%) y *morado* (77,78% vs. 56,06%). Sin embargo, para *verde* (41,18% vs. 46%) y sobre todo para *marrón* (45,45% vs. 63,16%), este observador mostró un rendimiento peor que el grupo de protanopes.

Como contraposición, comparando las Tablas 6.13.1 y 6.20.2 puede comprobarse que el observador JJMC (P7) cometió bastantes más errores que el grupo de protanopes. Sin lugar a dudas destaca un 0% de aciertos para la categoría *morado* (el porcentaje de error con la categoría *azul* fue del 97,62%). Este dato es el que hace que en la Tabla 6.15.1 y aparezcan 7 observadores, en lugar de los 8 que conforman el grupo de protanopes, en la casilla correspondiente al número de observadores que acertaron en

alguno de los estímulos seleccionados como pertenecientes a la categoría *morado*. Así mismo, en comparación con su grupo, este observador cometió un mayor porcentaje de errores en las categorías *rojo* (33,33% de aciertos vs. 58%), *gris* (36,36% vs. 51,75%), *naranja* (40% vs. 51,22%), *marrón* (50% vs. 63,16%) y *amarillo* (66,67% vs. 75%). Sin embargo, su rendimiento fue superior en la categoría *azul* (80% vs. 60%), y sobre todo en *verde* (75% vs. 46%).

Tabla 6.20.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JMI (P6) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra el mismo tipo de información que en la Tabla 6.13.1 pero para el observador protanope que mostró el mejor índice de aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	66,67							33,33				0,00
N		83,33				16,67						0,00
R			100									0,00
V				41,18	3,49		55,34					0,00
Am					100							0,00
Az						66,67				33,33		0,00
Mar		8,44		29,22			45,45		16,88			0,00
Ros								75,00		17,05	6,82	1,14
Nar							14,29		85,71			0,00
Mor						15,87		4,23		77,78		2,12
Gri				29,17		3,13	6,25			11,46	50,00	0,00

Tabla 6.20.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JJMC (P7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra el mismo tipo de información que en la Tabla 6.13.1 pero para el observador protanope que mostró el peor índice de aciertos (de acuerdo con el porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB).

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	71,43							28,57				0,00
N		100										0,00
R			33,33				66,67					0,00
V				75,00			6,67		18,33			0,00
Am				33,33	66,67							0,00
Az						80,00		18,75				1,25
Mar				50,00			50,00					0,00
Ros								40,00		48,89	9,63	1,48
Nar				6,15	39,23		14,62		40,00			0,00
Mor						97,62				0,00		2,38
Gri				25,82				32,28			36,36	5,53

Si comparamos las Tablas 6.13.2 y 6.21.1, podemos establecer rápidamente que el observador AEM (D4) cometió bastantes menos errores que el grupo de deuteranopes. Concretamente, no cometió errores al seleccionar ejemplares de *amarillo* ni de *azul* (100% vs 74,36% y 73,58%, respectivamente), y su rendimiento fue

claramente superior para otras categorías como *gris* (81,82% vs. 43,24%), *morado* (75% vs. 57,97%), *rosa* (53,33% vs. 42,55%), *verde* (46,15% vs. 38,86%) y *marrón* (65% vs. 54,93%). Por el contrario, su porcentaje de acierto fue menor que el correspondiente a su grupo en *naranja* (77,78% vs. 84,91%), y sobre todo en *rojo* (55,56% vs. 70,77%).

Tabla 6.21.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope AEM (D4) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra el mismo tipo de información que en la Tabla 6.13.2 pero para el observador deuteranope que mostró el mejor índice de aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	71,43							28,57				0,00
N		80,00				20,00						0,00
R			55,56				3,23		41,21			0,00
V				46,15	12,53		7,89				26,92	6,50
Am					100							0,00
Az						100						0,00
Mar		14,66			8,04		65,00				6,15	6,15
Ros								53,33		25,08	20,42	1,17
Nar				11,11	11,11				77,78			0,00
Mor		10,81						10,14		75,00		4,05
Gri	16,67										81,82	1,52

Tabla 6.21.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope JD (D7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra el mismo tipo de información que en la Tabla 6.13.2 pero para el observador deuteranope que mostró el peor índice de aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	66,67				15,94			17,39				0,00
N		100										0,00
R			60,00				19,66		20,34			0,00
V		24,47		37,50		10,54				14,31	10,92	2,26
Am				13,64	70,00				13,64			2,73
Az				20,00		80,00						0,00
Mar		16,67		19,79	3,13	5,21	50,00			3,47		1,74
Ros								57,14			40,60	2,26
Nar				3,02	36,98				60,00			0,00
Mor			25,80						28,61	41,67		3,93
Gri		12,27		20,46			12,82	11,18		10,37	32,35	0,55

Por último, examinemos el acierto con el que el observador JD (D7) realizó la tarea de mapa de colores, en relación con cómo lo hizo el grupo de deuteranopes. Comparando las Tablas 6.13.2 y 6.21.2 observamos un menor porcentaje de aciertos en las categorías *naranja* (60,00% vs. 84,91%), *morado* (41,67% vs. 57,97%), *gris* (32,35% vs. 43,24%) y *rojo* (60,00% vs. 70,77%). Como contrapartida, el porcentaje de aciertos fue mayor en las categorías *rosa* (57,14% vs. 42,55%), *azul* (80% vs. 73,58%) y *negro*, en la que de hecho no cometió errores (100% vs. 86%).

Con el objetivo de comparar la ejecución de protanopes y deuteranopes, se llevó a cabo una serie de análisis empleando la prueba estadística U de Mann-Whitney, tomando como variable independiente el tipo de dicromatismo (protanopia vs. deuteranopia; contrastes unilaterales). Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

1. Tomando como VD el **porcentaje de aciertos** (que mide el grado global de ejecución de los observadores, véase la columna 2 de la Tabla 6.19) **no se obtuvieron diferencias significativas** entre los dos grupos de dicrómatas (medianas según el criterio estricto: 55,91 para protanopes vs. 55,41 para deuteranopes; $U = 35$, $p = 0,462$) (criterio laxo: 64,47 vs. 64,87; $U = 31$, $p = 0,315$). (Este resultado se mantiene si en lugar de emplear como VD el porcentaje de aciertos se utiliza cualquiera de las otras dos variables que aparecen en las columnas 3 y 4 de la Tabla 6.19: el porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB o el índice de solapamiento con TN).
2. Tomando como VD el **porcentaje de errores** cometidos por protanopes y deuteranopes **para cada CCB**, información representada en la Figura 6.7, se encontraron diferencias significativas, de manera que los protanopes cometieron un porcentaje de errores significativamente mayor que los deuteranopes, únicamente para la categoría **naranja** (medianas según ambos criterios: 49,65 vs. 0; en ambos casos $U = 5,5$; $p < 0,01$), y para la categoría **azul** (sólo según el criterio laxo; medianas: 26,67 vs. 0; $U = 17$; $p < 0,05$).

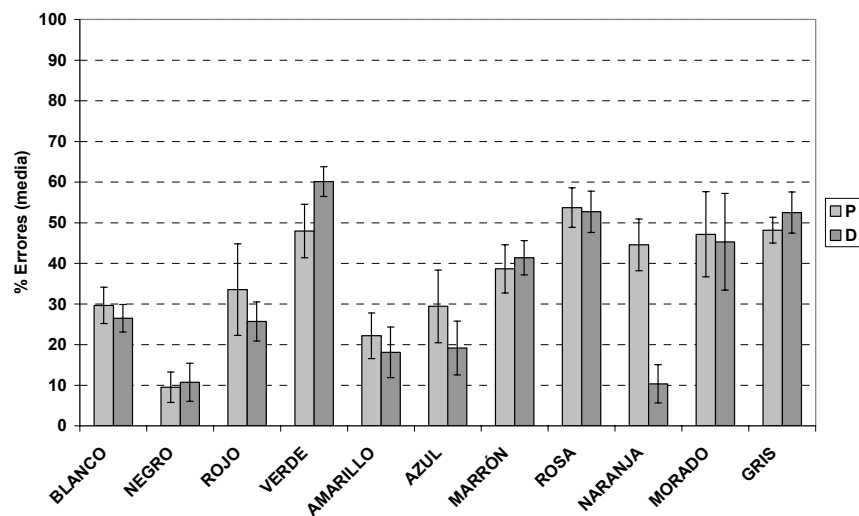


Figura 6.7. Promedio del porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes para cada CCB. A partir del criterio estricto para definir los aciertos. Barras de color gris claro: protanopes. Barras de color gris oscuro: deuteranopes. Las barras de error muestran el error típico de la media.

Es destacable que el uso de criterios tan dispares para definir los aciertos (y por tanto los errores) como son el criterio estricto y el laxo, apenas influye en las diferencias estadísticamente significativas que se han encontrado entre protanopes y deuteranopes.

Con respecto a la frecuencia de uso, en la Figura 6.8A se representa el promedio de la frecuencia de selección en función de las diferentes categorías para los tres grupos de observadores. La Figura 6.8B resalta las diferencias en frecuencia de uso de los dos grupos de dicrómatas con respecto a los tricrómatas normales. Los puntos de color gris claro muestran, para cada categoría, el resultado de dividir el promedio de la frecuencia de uso en protanopes por el promedio de uso de esa misma CCB en tricrómatas normales. Los puntos de color gris oscuro representan la ratio entre los promedios de las frecuencias de uso en deuteranopes y tricrómatas normales. Por ejemplo, puede verse cómo los dos grupos de dicrómatas seleccionaron casi 2,5 veces más estímulos empleando la CCB *rosa* que los tricrómatas normales (como promedio). En cambio, la CCB *negro* se empleó con virtualmente la misma frecuencia en los tres grupos.

Como ya se comentó anteriormente, Bonnardel (2006), estudiando el uso de las 8 CCB cromáticas, encontró en dos observadores con defectos deuteran severos un uso muy elevado de las CCB *rosa* y *verde*, en detrimento de *azul* y *morado*. Como puede observarse con claridad en las Figuras 6.8A y 6.8B, *rosa* y *verde* son precisamente las dos CCB cromáticas que causaron un mayor número de selecciones por parte de los deuteranopes en este estudio. Se llevó a cabo una serie de análisis empleando las pruebas estadísticas de Kruskal-Wallis y U de Mann-Whitney, tomando como variable independiente el tipo de observador (tricromatismo normal, protanopia, deuteranopia). Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

- Tomando como VD la frecuencia de selección de estímulos para cada categoría, los análisis no paramétricos de la varianza (Kruskal-Wallis) mostraron la existencia de diferencias estadísticamente significativas para las categorías **rosa** [$\chi^2_{(2, N=32)} = 15,83, p < 0,001$], **naranja** [$\chi^2_{(2, N=32)} = 10,68, p < 0,005$], **blanco** [$\chi^2_{(2, N=32)} = 8,59, p < 0,05$], y **gris** [$\chi^2_{(2, N=32)} = 13,79, p < 0,005$]. Tras la aplicación de la prueba U de Mann-Whitney, se encontró que:

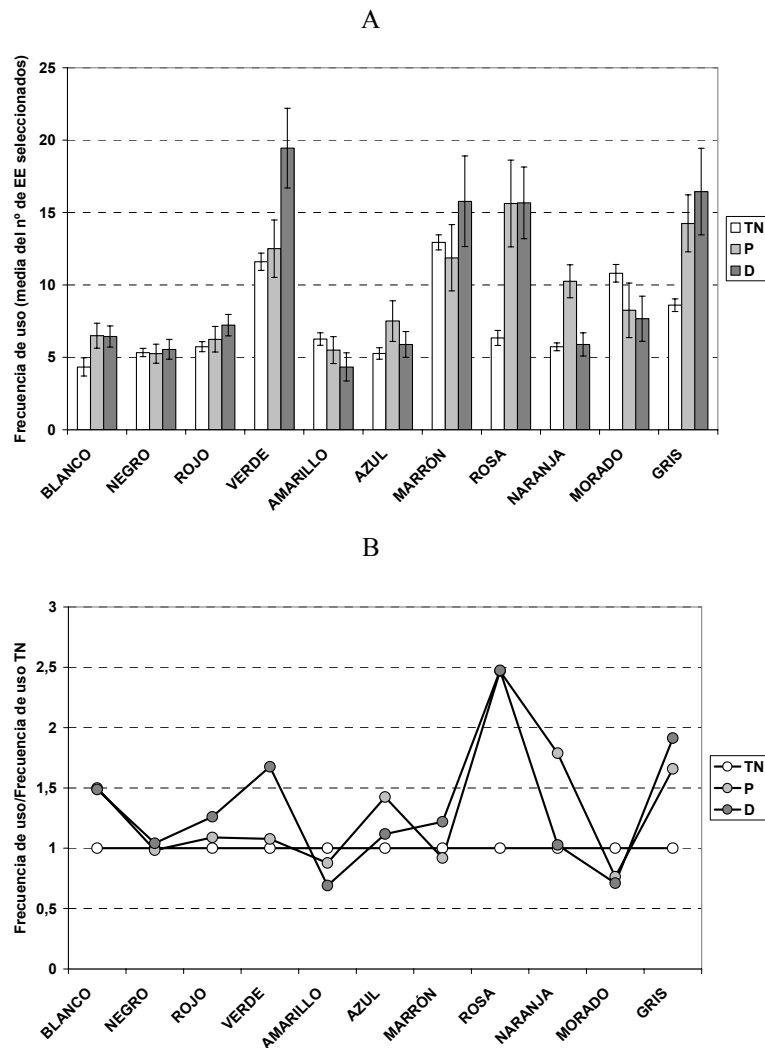


Figura 6.8. Frecuencia de selección de estímulos para cada TCB por parte de tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes. A: Promedio de la frecuencia de selección. Barras blancas: tricrómatas normales. Barras de color gris claro: protanopes. Barras de color gris oscuro: deuteranopes. Las barras de error muestran el error típico de la media. B: Ratio entre el promedio de la frecuencia de selección en cada grupo de observadores y el promedio de la frecuencia de selección en tricrómatas normales para cada TCB. Puntos blancos: tricrómatas normales. Puntos de color gris claro: protanopes. Puntos de color gris oscuro: deuteranopes. Nótese cómo los puntos blancos representan una función constante, igual a 1. Los puntos gris claro muestran el resultado de dividir el promedio de la frecuencia de uso de una CCB en protanopes por el promedio de la frecuencia uso de esa misma CCB en tricrómatas normales. Los puntos gris oscuro representan la ratio entre los promedios de las frecuencias de uso en deuteranopes y tricrómatas normales.

- a. Tanto los protanopes como los deuteranopes seleccionaron más estímulos dentro de las CCB *rosa*, *blanco* y *gris* que los TN (se indican las medianas para TN, P y D: *rosa*: 6, 13, 15; *blanco*: 4, 6,5, 7; *gris*: 9, 12,5, 14), sin existir diferencias entre ambos tipos de dicrómatas (*rosa*: P vs TN, $U = 8$, $p < 0,001$; D vs TN: $U = 14,5$, $p < 0,001$; *blanco*: P vs TN: $U = 27,5$, $p < 0,05$, D vs TN; $U = 24$, $p < 0,01$, *gris*: P vs TN: $U = 15$, $p < 0,005$, D vs TN: $U = 15,5$, $p < 0,005$).

- b. **Los protanopes seleccionaron más estímulos dentro de la CCB naranja que los TN y los D**, sin existir diferencias significativas entre estos dos grupos (se indican las medianas para TN, P y D: 6, 10,5, 6. P vs TN: $U = 13$, $p < 0,005$; P vs D: $U = 9,5$, $p < 0,05$).
- c. **Los deuteranopes seleccionaron más estímulos dentro de la CCB verde que los TN** (contraste unilateral; medianas para TN, P y D: 12, 12, 21; D vs TN: $U = 31$, $p < 0,05$).

Para comprobar si la frecuencia de uso pudiera ser una variable relevante de cara a explicar las diferencias individuales encontradas en el grado de acierto de los observadores dicrómatas, se estudió, mediante regresión lineal simple, la relación existente entre dicha variable, tomada como variable independiente, y las siguientes variables dependientes: 1) número de aciertos, 2) número de errores, y 3) porcentaje de errores.

Para facilitar la interpretación de la variable frecuencia de uso, se realizó una simple transformación que dio lugar a la variable *ratio de la frecuencia de uso*. Dicha transformación consistió en dividir el número de estímulos seleccionados por cada dicrómata por el valor promedio de estímulos seleccionados por el grupo de tricrómatas normales. De esta manera, un valor de 1 indica que un observador dicrómata seleccionó el mismo número de estímulos que los tricrómatas normales como promedio, y valores mayores y menores que 1 indican que se seleccionaron más o menos estímulos, respectivamente, que los tricrómatas normales como promedio, además de indicar exactamente en qué grado (una ratio de 2 indicaría que un observador seleccionó el doble de estímulos, y una ratio de 0,5, que seleccionó exactamente la mitad de estímulos que el promedio de los tricrómatas normales). Por ejemplo, si los tricrómatas normales seleccionaron como media 82,93 estímulos en la tarea de mapa de colores, para el protanope JJMC (P7), que seleccionó un total de 65 estímulos, se computó un valor en la variable *ratio de la frecuencia de uso* igual a $65/82,93 = 0,78$. Para el protanope LEL (P1), que seleccionó un total de 163 estímulos, el valor de la nueva variable fue $163/82,93 = 1,97$. (Por supuesto, esta simple transformación lineal no afecta a los valores de R^2 ni de F de los que se informará a continuación, únicamente al valor de la pendiente de la recta ajustada a los datos mediante regresión lineal).

La Figura 6.9 representa, para el conjunto de observadores protanopes y deuteranopes ($n = 17$), el número de aciertos (6.9-A1: criterio laxo; 6.9-A2: criterio estricto), el número de errores (6.9-B1: criterio laxo; 6.9-B2: criterio estricto), y el porcentaje de errores (6.9-C1: criterio laxo; 6.9-C2: criterio estricto) en función de la variable independiente *ratio de la frecuencia de uso*. Los resultados encontrados se resumen a continuación:

- Existió una clara relación lineal positiva entre la ratio de la frecuencia de uso y el número de aciertos, que resultó ser estadísticamente significativa (criterio laxo: $R^2 = 0,84$, $F_{(1,15)} = 76,51$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,85$, $F_{(1,15)} = 84,19$, $p < 0,001$; Figuras 6.9-A1 y 6.9-A2 respectivamente).
- También existió una clara relación lineal positiva entre la ratio de la frecuencia de uso y el número de errores, que también fue estadísticamente significativa (criterio laxo: $R^2 = 0,77$, $F_{(1,15)} = 51,54$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,89$, $F_{(1,15)} = 121,22$, $p < 0,001$; Figuras 6.9-B1 y 6.9-B2 respectivamente).
- Sin embargo, no existió dicha relación entre la ratio de la frecuencia de uso y el porcentaje de errores (criterio laxo: $R^2 = 0,07$, $F_{(1,15)} = 1,20$, $p = 0,290$; criterio estricto: $R^2 = 0,16$, $F_{(1,15)} = 2,82$, $p = 0,114$; Figuras 6.9-C1 y 6.9-C2 respectivamente).

Si se repiten los análisis por separado para el grupo de protanopes y deuteranopes, se mantienen los mismos resultados en lo relativo a la existencia de diferencias significativas. Concretamente:

- La relación lineal positiva entre la ratio de la frecuencia de uso y el número de aciertos fue estadísticamente significativa.
 - a. Protanopes (criterio laxo: $R^2 = 0,87$, $F_{(1,6)} = 39,64$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,88$, $F_{(1,6)} = 41,88$, $p < 0,001$; Figuras 6.10-A1 y 6.10-A2 respectivamente).
 - b. Deuteranopes (criterio laxo: $R^2 = 0,80$, $F_{(1,7)} = 27,50$, $p < 0,005$; criterio estricto: $R^2 = 0,82$, $F_{(1,7)} = 31,87$, $p < 0,001$; Figuras 6.11-A1 y 6.11-A2 respectivamente).
- También fue estadísticamente significativa la relación lineal positiva entre la ratio de la frecuencia de uso y el número de errores.

- a. Protanopes (criterio laxo: $R^2 = 0,79$, $F_{(1,6)} = 22,05$, $p < 0,01$; criterio estricto: $R^2 = 0,91$, $F_{(1,6)} = 63,78$, $p < 0,001$; Figuras 6.10-B1 y 6.10-B2 respectivamente).
- b. Deuteranopes (criterio laxo: $R^2 = 0,78$, $F_{(1,7)} = 24,33$, $p < 0,01$; criterio estricto: $R^2 = 0,86$, $F_{(1,7)} = 43,43$, $p < 0,001$; Figuras 6.11-B1 y 6.11-B2 respectivamente).
- Sin embargo, la relación lineal entre la ratio de la frecuencia de uso y el porcentaje de errores no alcanzó el nivel de significación:
 - a. Protanopes (criterio laxo: $R^2 = 0,01$, $F_{(1,6)} = 0,06$, $p = 0,820$; criterio estricto: $R^2 = 0,14$, $F_{(1,6)} = 1,01$, $p = 0,353$; Figuras 6.10-C1 y 6.10-C2 respectivamente).
 - b. Deuteranopes (criterio laxo: $R^2 = 0,24$, $F_{(1,7)} = 2,175$, $p = 0,184$; criterio estricto: $R^2 = 0,17$, $F_{(1,7)} = 1,42$, $p = 0,272$; Figuras 6.11-C1 y 6.11-C2 respectivamente).

La conclusión general que puede extraerse del estudio de estas relaciones es la siguiente: mientras que la varianza de las variables *Nº de aciertos* y *Nº de errores* resulta ser explicada en gran medida (valores de R^2 muy elevados) a partir de la variable *frecuencia de uso* (es decir, a más frecuencia de uso, más aciertos, y también más errores), la variable *frecuencia de uso* es absolutamente insuficiente para explicar la ejecución de los observadores, expresada mediante la variable *porcentaje de errores*.

A modo de ejemplo, en la Figura 6.10 se resaltan los datos correspondientes a los observadores JMI (P6), mediante puntos grises, y JJMC (P7), mediante puntos negros, que obtuvieron, respectivamente, el mayor y el menor porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB en la tarea de mapa de colores conforme se indica en la Tabla 6.19 (recuérdese que las Tablas 6.20.1 y 6.20.2 muestran sus porcentajes de acierto y error en función de los diferentes TCB). De la misma manera, en la Figura 6.11 se resaltan los datos correspondientes a los observadores AEM (D4) (puntos grises) y JP (D7) (puntos negros), que obtuvieron respectivamente el mayor y el menor porcentaje de aciertos en la tarea de mapa de colores de acuerdo a la Tabla 6.19 (recuérdese que las Tablas 6.21.1 y 6.21.2 muestran sus porcentajes de acierto y error en función de los diferentes TCB).

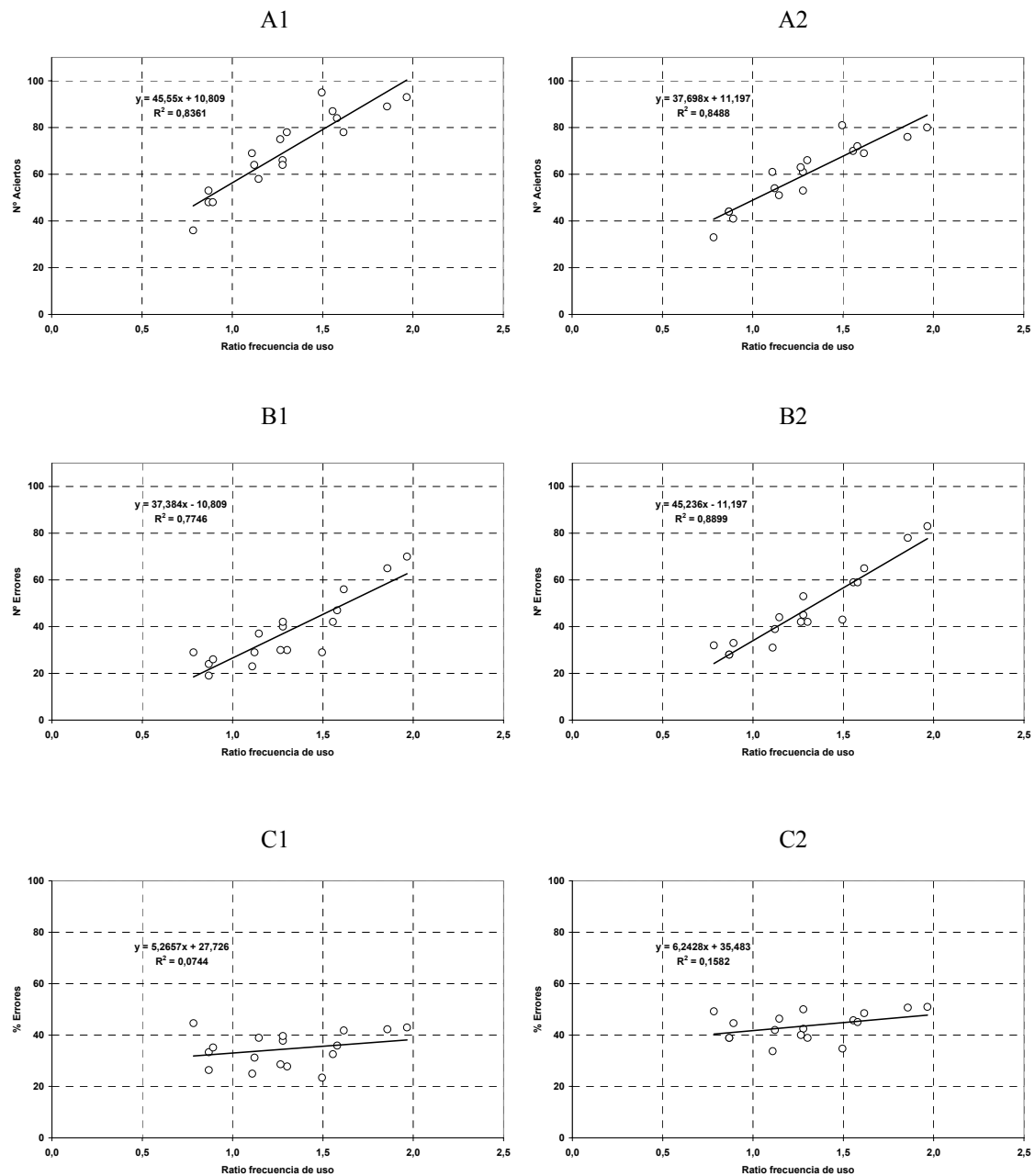


Figura 6.9. Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”. Cada columna corresponde al uso de uno de los dos criterios seguidos para definir los aciertos: criterio laxo (primera columna), criterio estricto (segunda columna). Cada fila se refiere a un aspecto diferente de la ejecución de los observadores: aciertos (primera fila), errores (segunda fila), y porcentaje de errores (tercera fila). En cada gráfica se representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados, así como la ecuación y el valor de R^2 correspondientes. Nótese cómo la asociación lineal existente entre las variables número de aciertos y número de errores y la variable ratio de la frecuencia de uso es muy fuerte. Por el contrario, la relación entre la variable porcentaje de errores y la variable ratio de la frecuencia de uso es prácticamente nula. Más detalles en el texto.

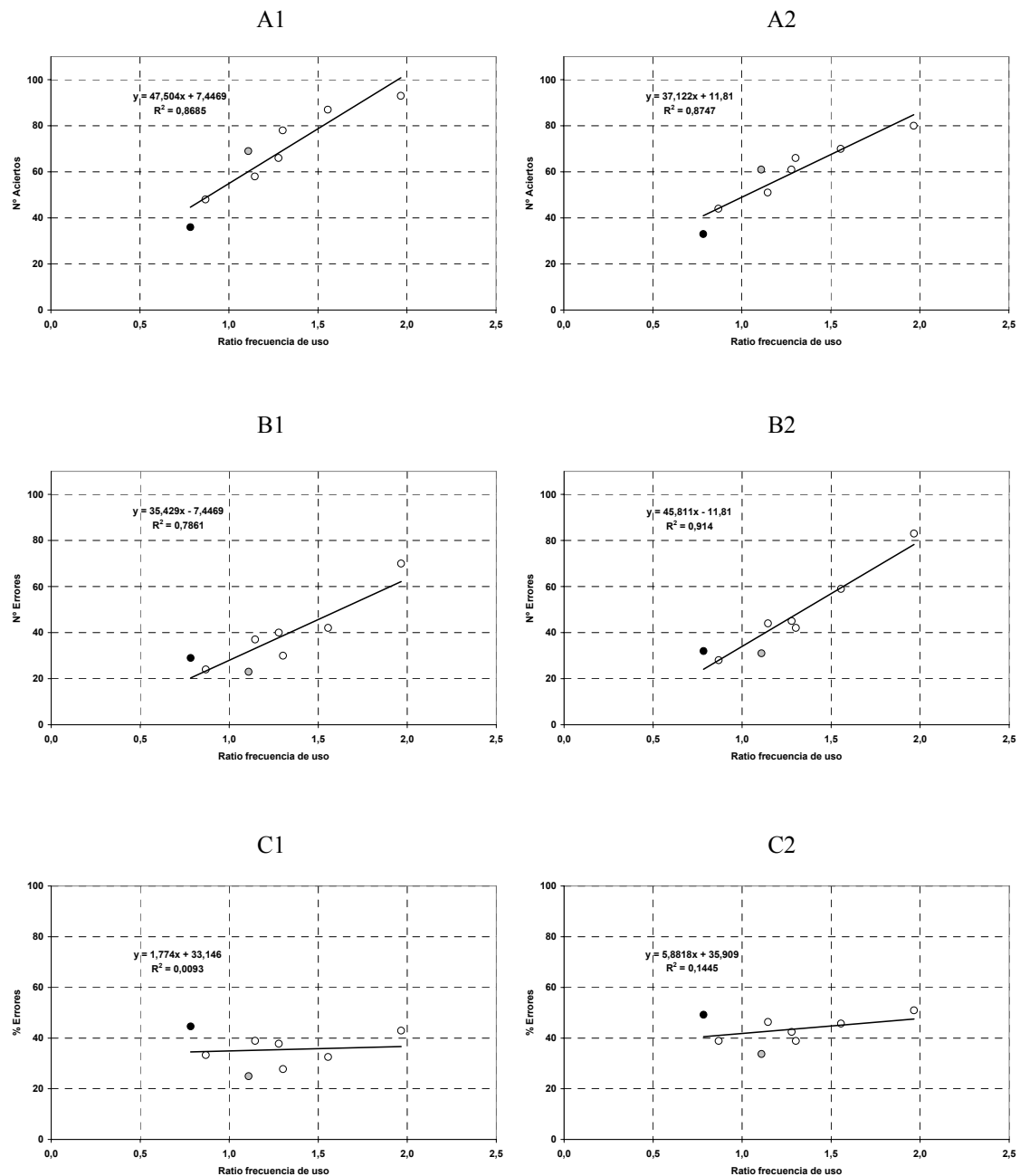


Figura 6.10. Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por protanopes en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”. Cada columna corresponde al uso de uno de los dos criterios seguidos para definir los aciertos: criterio laxo (primera columna), criterio estricto (segunda columna). Cada fila se refiere a un aspecto diferente de la ejecución de los observadores: aciertos (primera fila), errores (segunda fila), y porcentaje de errores (tercera fila). Los puntos negros corresponden a JJMC (P7), y los grises a JMI (P6) (véanse las Tablas 6.20.1-6.20.2). En cada gráfica se representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados, así como la ecuación y el valor de R^2 correspondientes.

Nótese cómo en las Figuras 6.10 y 6.11, los puntos grises siempre están por encima de la línea de regresión cuando la VD es el número de aciertos, y por debajo cuando la VD es el número de errores o el porcentaje de errores. Como contraposición, con los puntos negros el patrón es exactamente el opuesto.

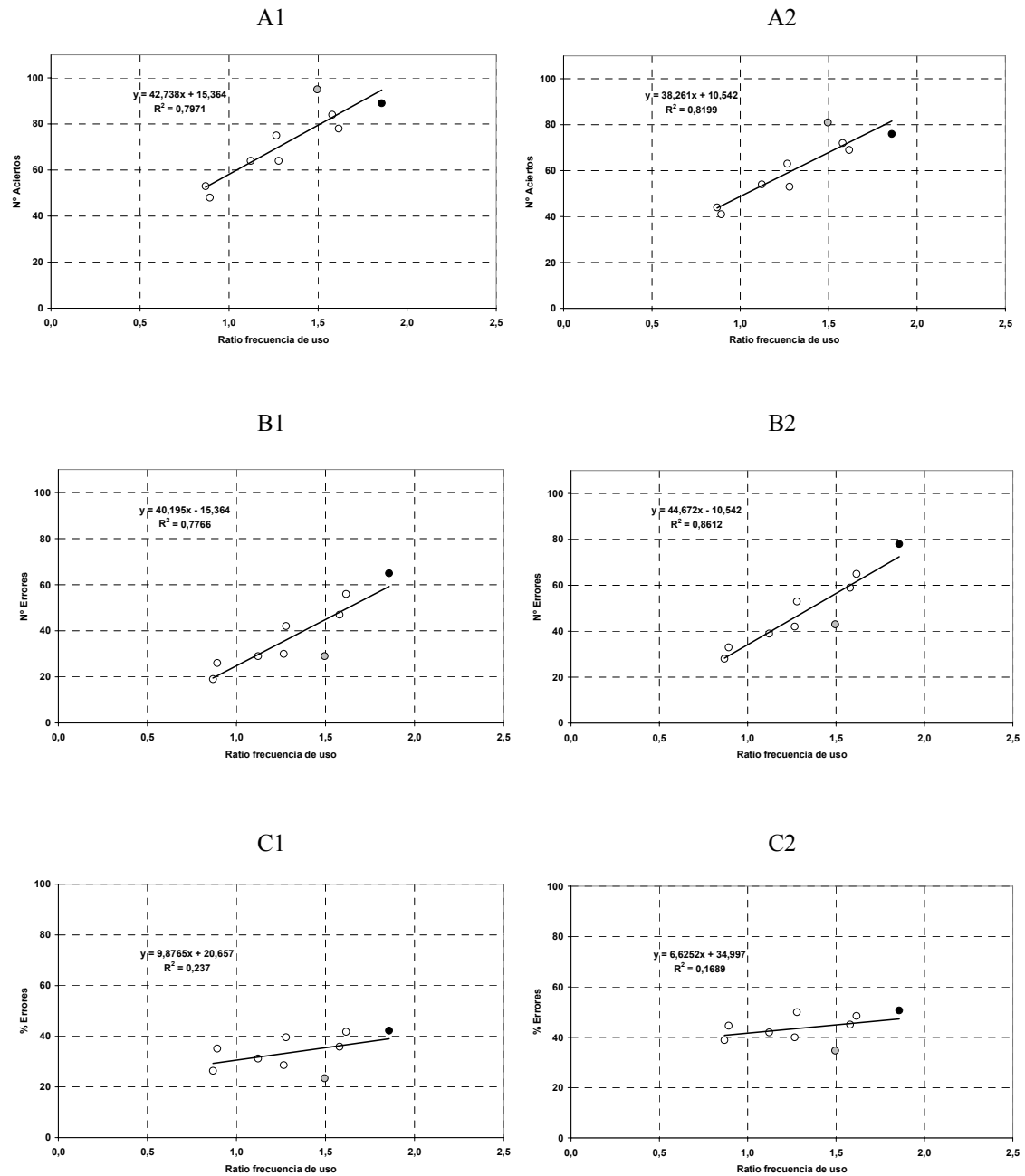


Figura 6.11. Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por deuteranopes en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”. Cada columna corresponde al uso de uno de los dos criterios seguidos para definir los aciertos: criterio laxo (primera columna), criterio estricto (segunda columna). Cada fila se refiere a un aspecto diferente de la ejecución de los observadores: aciertos (primera fila), errores (segunda fila), y porcentaje de errores (tercera fila). Los puntos negros corresponden a JP (D7), y los grises a AEM (D4) (véanse las Tablas 6.21.1-6.21.2). En cada gráfica se representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados, así como la ecuación y el valor de R^2 correspondientes.

III. *Análisis colorimétrico de los errores.*

En la introducción de este estudio se hizo explícito que uno de sus objetivos era evaluar la adecuación de dos modelos diferentes de predicción de errores en el uso de TCB en daltónicos dicrómatas: 1) El **Modelo A**, o modelo de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada, y 2) el **Modelo B**, o modelo de predicción de errores (basado en líneas de confusión y claridad transformada) incluyendo discriminación residual *rojo-verde*.

Las Figuras 6.12 y 6.13 representan los resultados obtenidos en la tarea de mapa de colores empleando para ello el diagrama de cromaticidad $CIE_{u'v'} 1976$. Para cada categoría, se representan, mediante cruces, los estímulos seleccionados por los tricrómatas normales, y, mediante círculos, los estímulos seleccionados por los protanopes (Figura 6.12) y los deuteranopes (Figura 6.13). El tamaño de los símbolos codifica la frecuencia de selección (a mayor tamaño, más observadores seleccionaron el estímulo). El criterio seguido para realizar tanto las representaciones de las Figuras 6.12 y 6.13 como los análisis que se describen a continuación, fue el criterio laxo para definir los aciertos, es decir, el criterio más conservador para definir una respuesta como error. Por lo tanto, los círculos sobre cruces representan aciertos (estímulos seleccionados por dicrómatas y por tricrómatas normales), y los círculos en blanco representan errores (estímulos únicamente seleccionados por dicrómatas). Además, para cada categoría se representan dos líneas que parten del punto de confusión correspondiente, cuyo significado será explicado en breve.

El primer paso seguido para efectuar un análisis colorimétrico de los errores cometidos se describe a continuación (véanse los apartados 1.3.1.1. y 1.3.1.3):

1. Para cada estímulo j , se determinaron los siguientes descriptores colorimétricos:
 - a. **Líneas de confusión protanope y deuteranope correspondientes en el diagrama de cromaticidad $CIE_{u'v'} 1976$.** Es decir, se determinaron la pendiente y la constante de la línea recta (los parámetros a y b de la ecuación general $v' = au' + b$) que pasa por el punto definido por las coordenadas cromáticas del estímulo j (u'_j, v'_j) y por el punto de confusión protanope ($u'_p = 0,658, v'_p = 0,501$) o deuteranope ($u'_d = -1,2,$

$v'_d = 0,783$). Las líneas que parten de los puntos de confusión en las Figuras 6.12 (protanopes) y 6.13 (deuteranopes) tienen una pendiente igual a la mediana de la distribución de las pendientes de confusión para los aciertos (líneas continuas) y para los errores (líneas discontinuas).

- b. **Claridad transformada protanope, L^*_p y deuteranope, L^*_d .** Para computar estos valores se siguieron los pasos que se describen a continuación: 1) En primer lugar se estimaron las respuestas de los conos L y M para cada estímulo, empleando para ello las funciones de sensibilidad espectral $L_2(\lambda)$ y $M_2(\lambda)$ tabuladas en Stockman y Sharpe (2000), y las funciones espectrales de los estímulos. 2) La contribución relativa de los conos L y M a la luminosidad se computó a partir de la expresión $V_2^*(\lambda) = 1,5L_2(\lambda) + M_2(\lambda)$ (ecuación 7 en el artículo original). 3) Estas estimaciones permiten computar, junto con el factor de luminancia de los estímulos (Y), el factor de luminancia específica para protanopes (Y_p) y deuteranopes (Y_d) (bajo el supuesto de que ante el blanco de referencia el factor de luminancia es igual para los tres tipos de observadores). 4) Seguidamente, se computaron los valores de claridad asociados, a partir de la expresión general de la CIE que permite computar la claridad, L^* , a partir del factor de luminancia, Y :

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16,$$

donde Y_n es el factor de luminancia del blanco de referencia: Wyszecki y Stiles, 1982)³.

2. **Se compararon los aciertos y los errores** conforme a la siguiente lógica, derivada del Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada: Para cada categoría y cada tipo de dicrómata, se compararon (empleando para ello la prueba estadística U de Mann-Whitney) las distribuciones obtenidas para aciertos y para errores:
 - a. Del parámetro a (la pendiente protanope o deuteranope).
 - b. De la claridad transformada (protanope o deuteranope).

³ Para todos los estímulos se cumplió la condición $Y/Y_n > 0,008856$.

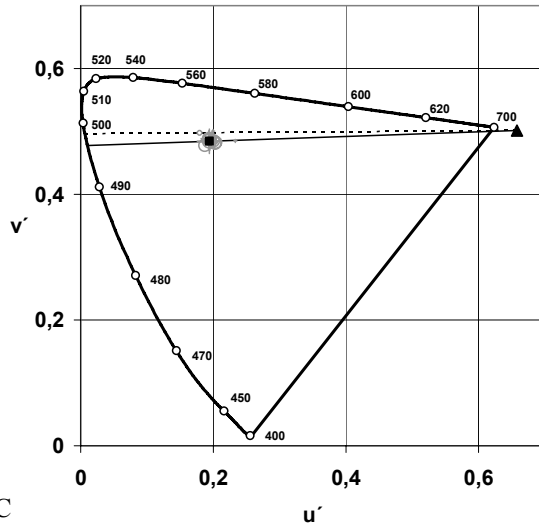
Las Tablas 6.22 (protanopes) y 6.23 (deuteranopes) resumen los resultados de los análisis efectuados. Respecto al parámetro a (en las tablas aparece multiplicado por 1000, para facilitar la lectura), hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para *blanco*, *amarillo*, *azul*, *naranja* y *gris* en el caso de los protanopes (Tabla 6.22), y para *amarillo*, *azul*, *marrón* y *rosa* en el de los deuteranopes (Tabla 6.23).

Las dos primeras filas muestran la mediana de la distribución de este parámetro para los aciertos ($a_{p,acs}$) y para los errores ($a_{p,ers}$), y la tercera la diferencia existente entre ambas ($a_{p,acs} - a_{p,ers}$) (el primer subíndice indica el tipo de dicrómata: p , protanopes, d , deuteranopes). Para poder interpretar la magnitud de dicha diferencia, debe tenerse en cuenta que el rango del parámetro a para la muestra de estímulos empleada (valor absoluto de la diferencia entre las pendientes máxima y mínima) fue 353 ($0,353 \times 1000$) para protanopes y 138 para deuteranopes.

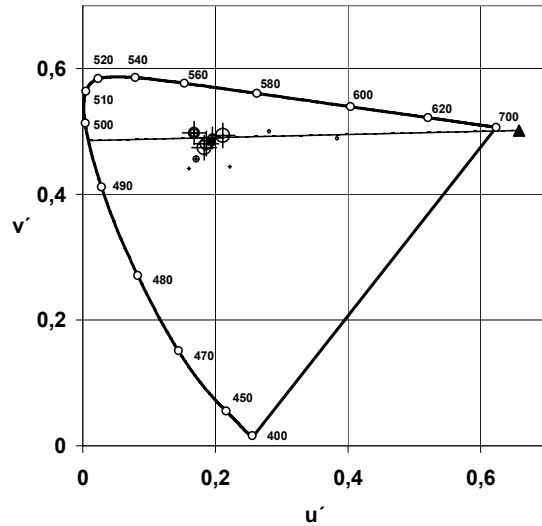
Respecto a la claridad transformada, existieron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para *verde*, *amarillo*, *marrón*, *naranja* y *morado* en el caso de los protanopes (Tabla 6.22), y para *naranja* y *gris* el caso de los deuteranopes (Tabla 6.23).

Nuevamente, se muestra tanto la mediana para los aciertos ($L^*_{p,acs}$) y para los errores ($L^*_{p,ers}$) como la diferencia entre ambas ($L^*_{p,acs} - L^*_{p,ers}$). Para poder interpretar la magnitud de la misma, debe tenerse en cuenta que el rango de L^* para la muestra de los estímulos empleada fue igual a 74,35 ($L^* = 92,31$ para la muestra S 0500-N y $L^* = 17,96$ para la muestra S 9000-N. Evidentemente, este rango se mantiene prácticamente invariable para protanopes y deuteranopes al tratarse de estimulación acromática).

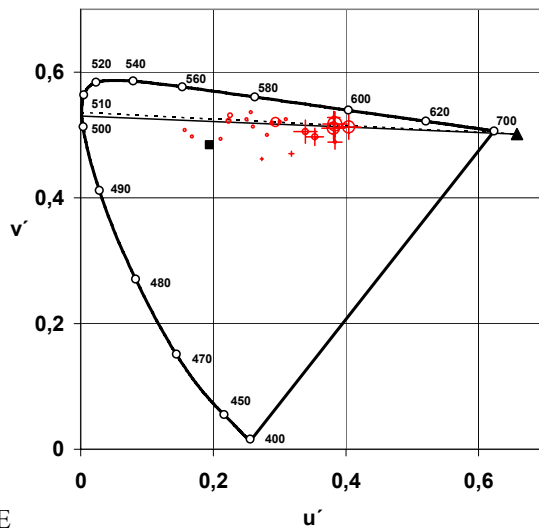
A



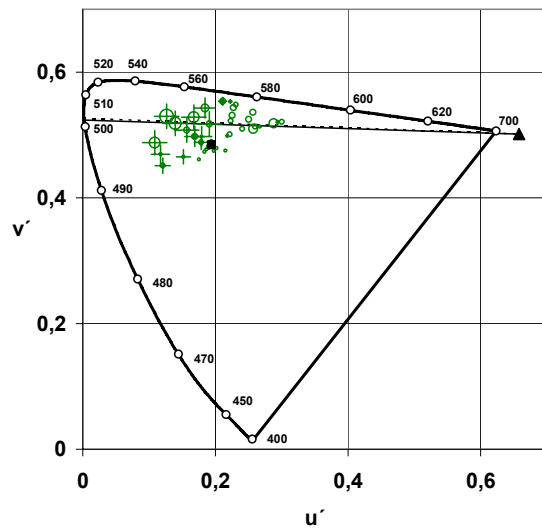
B



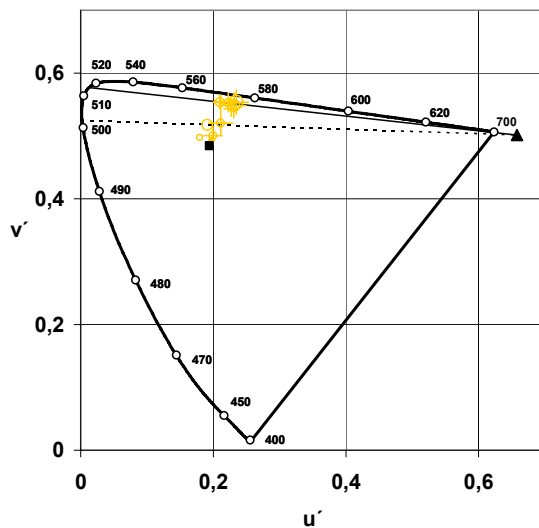
C



D



E



F

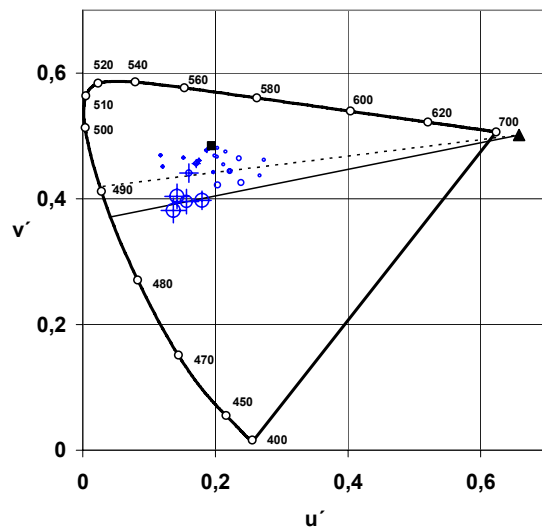
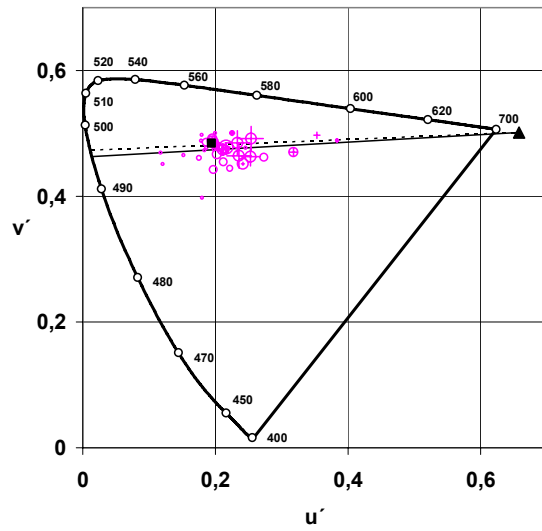
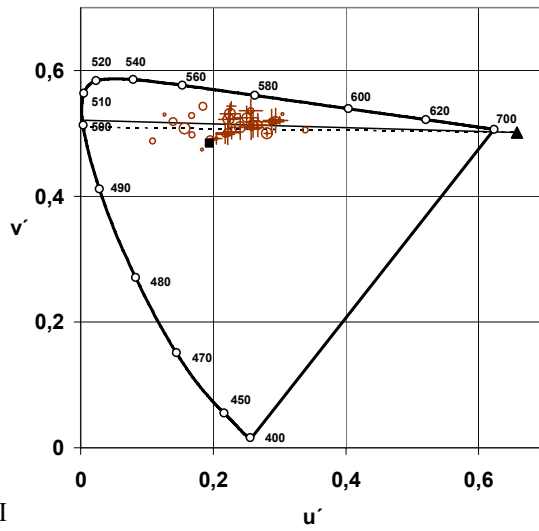


Figura 6.12. Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y protanopes en la tarea de mapa de colores. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Cruces: tricrómatas normales. Círculos: Protanopes. El tamaño codifica la frecuencia de selección. Cuadrado negro: punto acromático. Triángulo negro: punto de confusión protanope. Las líneas que parten del punto de confusión tienen una pendiente igual a la mediana de la distribución de este parámetro para los aciertos (línea continua) y los errores (línea discontinua). La Figura 6.12 continúa en la página siguiente.

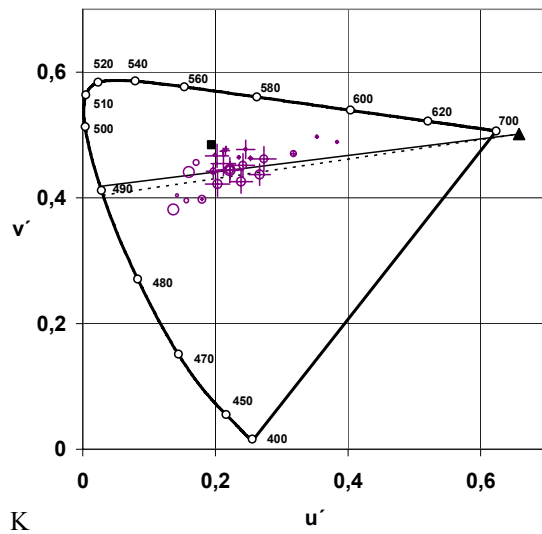
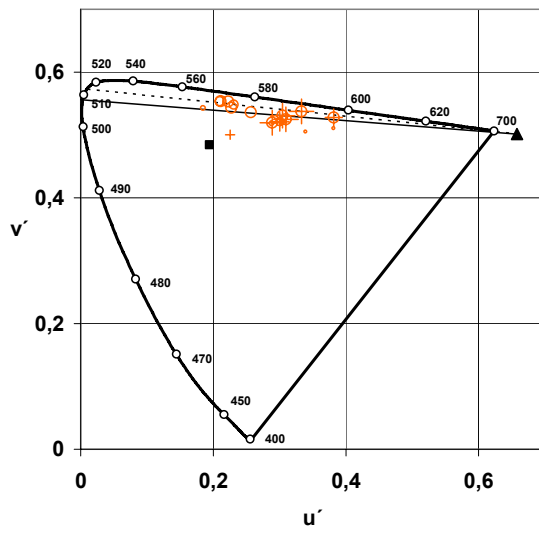
G

H



I

J



K

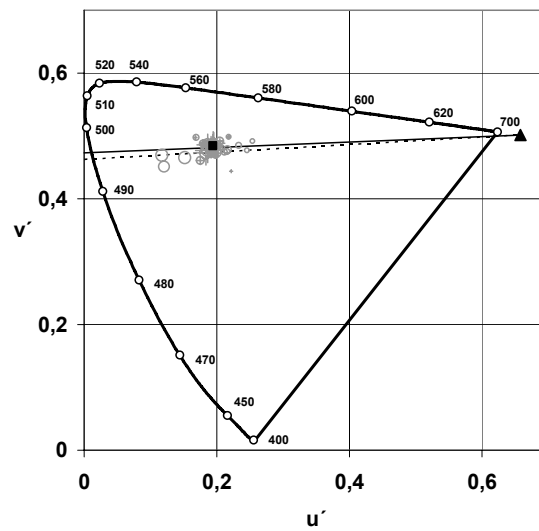
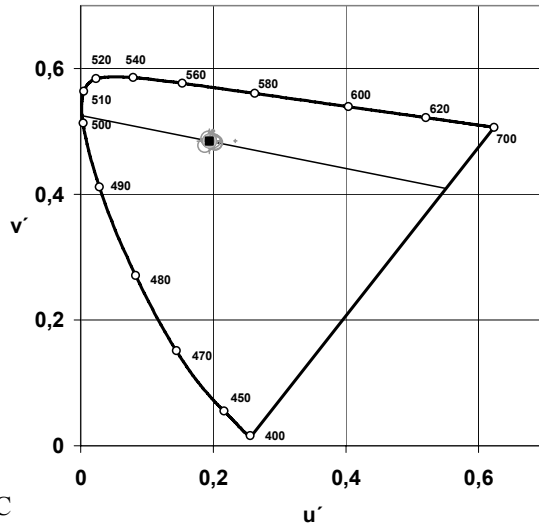
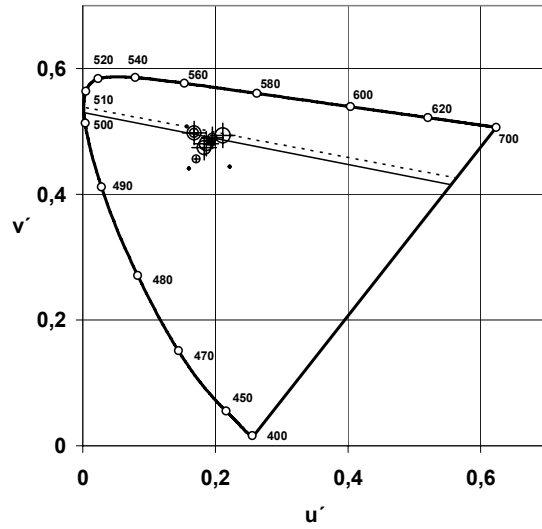


Figura 6.12. (Continuación).

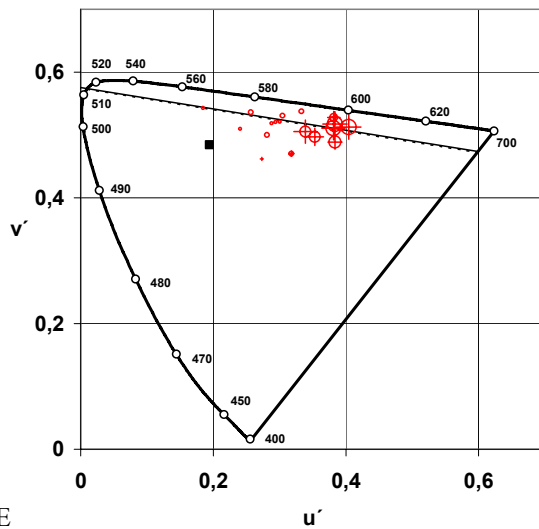
A



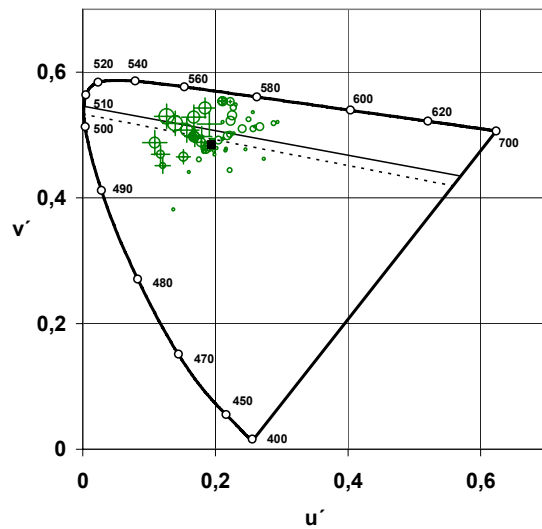
B



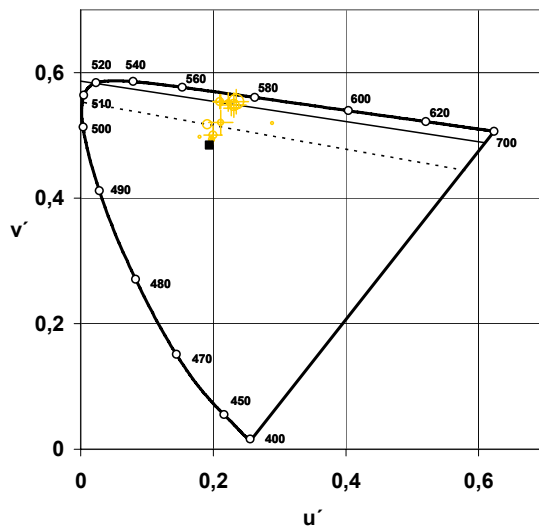
C



D



E



F

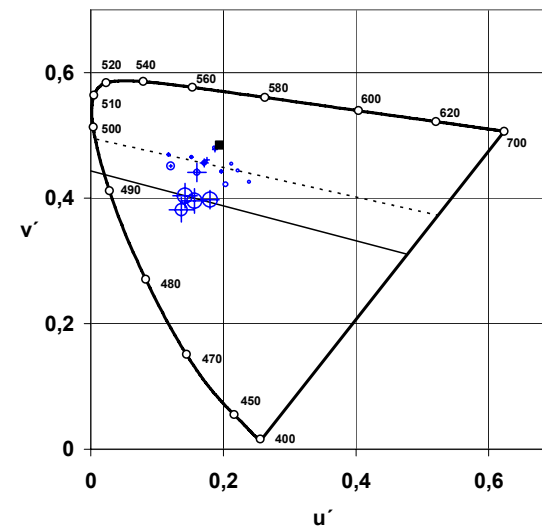
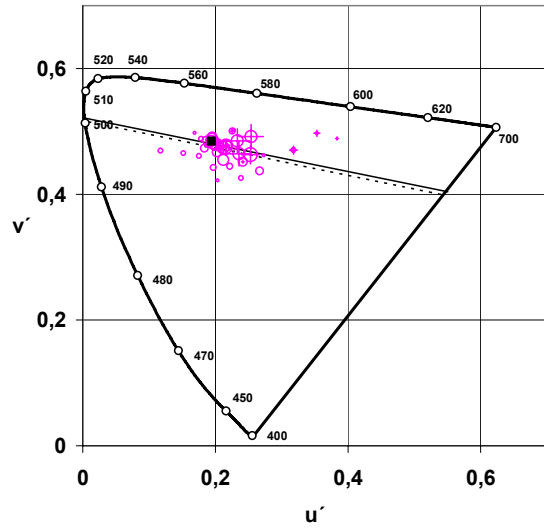
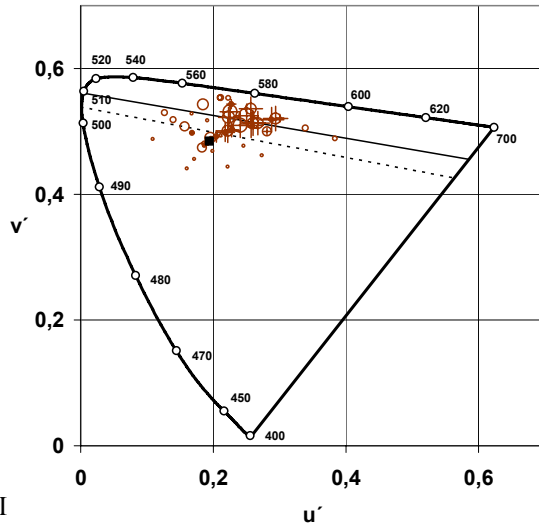


Figura 6.13. Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y deuteranopes en la tarea de mapa de colores. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Cruces: tricrómatas normales. Círculos: Deuteranopes. El resto de símbolos conserva el mismo significado que en la Figura 6.12 (el punto de confusión deuteranope cae fuera de la representación). La Figura 6.13 continúa en la página siguiente.

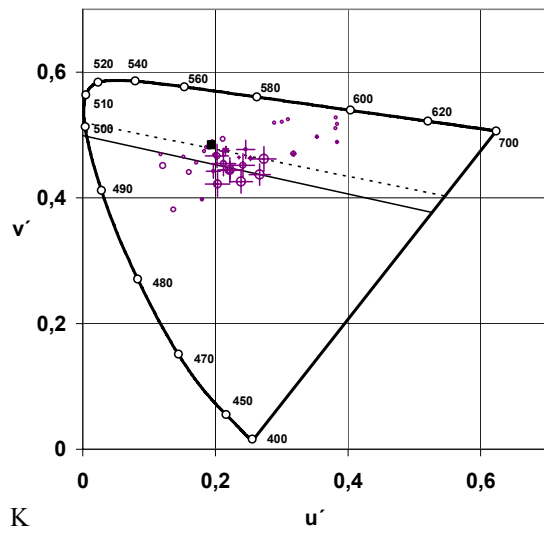
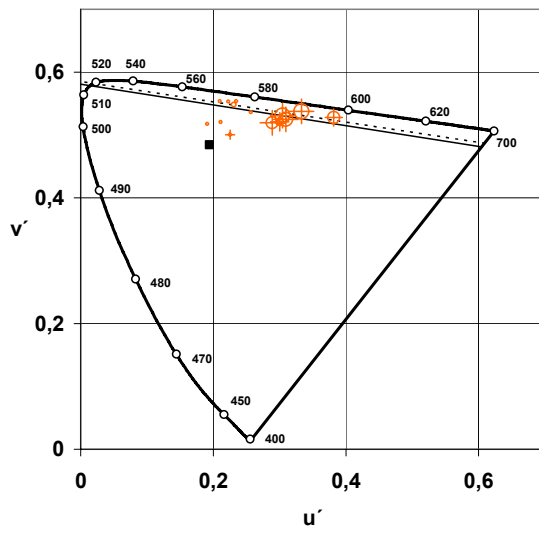
G

H



I

J



K

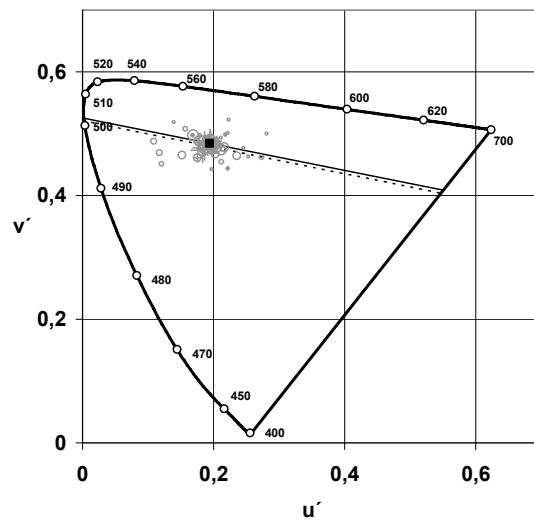


Figura 6.13. (Continuación).

Tabla 6.22. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de aciertos y errores cometidos por protanopes en la tarea de mapa de colores. Se muestra la mediana de la distribución del parámetro a (pendiente de la línea de confusión) para los aciertos ($a_{p,acs}$) y los errores ($a_{p,ers}$), así como la mediana de la distribución de la claridad protanope para los aciertos ($L^*_{p,acs}$) y los errores ($L^*_{p,ers}$). U: valor del estadístico de contraste. Mediante asteriscos se muestran los contrastes estadísticamente significativos (también se indica el valor de la significación exacta, sig.). Entre paréntesis se muestra el número de aciertos o errores correspondiente.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
$a_{p,acs}$	36,71 (50)	24,91 (40)	-44,00 (30)	-34,21 (52)	-117,24 (35)	211,18 (41)	-29,99 (66)	59,47 (63)	-83,12 (42)	131,36 (48)	42,80 (68)
$a_{p,ers}$	7,78 (2)	24,77 (2)	-52,36 (20)	-38,27 (48)	-35,28 (9)	130,67 (19)	-12,73 (29)	43,66 (62)	-109,93 (40)	155,05 (18)	58,83 (46)
$a_{p,acs} - a_{p,ers}$	28,93	0,14	8,36	4,07	-81,96	80,51	-17,26	15,81	26,81	-23,68	-16,03
U	0*	29	230	1218	42***	123***	911	1729	384***	327	868***
sig.	,001	,537	,166	,838	,000	,000	,713	,270	,000	,132	,000
$L^*_{p,acs}$	80,29	22,32	30,65	46,19	72,20	45,21	31,69	61,62	50,98	36,31	53,01
$L^*_{p,ers}$	80,87	24,13	28,92	41,13	79,26	38,62	36,38	56,73	59,26	26,22	55,96
$L^*_{p,acs} - L^*_{p,ers}$	-0,58	-1,81	1,73	5,06	-7,06	7,29	-4,69	4,69	-8,29	10,09	-2,94
U	44	16	257	851**	54**	361	687*	1835	424***	225**	1398
sig.	,831	,214	,398	,006	,002	,655	,028	,562	,000	,002	,339

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

Tabla 6.23. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de aciertos y errores cometidos por deuteranopes en la tarea de mapa de colores. Se muestra la mediana de la distribución del parámetro a (pendiente de la línea de confusión) para los aciertos ($a_{d,acs}$) y los errores ($a_{d,ers}$), así como la mediana de la distribución de la claridad deuteranope para los aciertos ($L^*_{d,acs}$) los errores ($L^*_{d,ers}$). U: valor del estadístico de contraste. Mediante asteriscos se muestran los contrastes estadísticamente significativos (también se indica el valor de la significación exacta, sig.). Entre paréntesis se muestra el número de aciertos o errores correspondiente.

	B ^a	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
$a_{d,acs}$	-211,31 (41)	-207,27 (49)	-170,05 (52)	-194,66 (87)	-161,06 (32)	-278,63 (46)	-181,54 (86)	-214,23 (70)	-165,53 (45)	-232,86 (46)	-211,38 (79)
$a_{d,ers}$	-211,10 (17)	-200,08 (1)	-170,88 (13)	-204,61 (88)	-188,05 (7)	-235,33 (7)	-200,08 (56)	-217,82 (71)	-161,83 (8)	-215,22 (23)	-214,71 (69)
$a_{d,acs} - a_{d,ers}$	-0,22	-7,19	0,83	9,95	26,99	-43,30	18,14	3,58	-3,71	-17,64	3,33
U	289	0	332	3460	48*	33***	1559***	1708***	170	414	2225,5
sig.	,311	,040	,925	,272	,016	,001	,000	,001	,809	,145	,054
$L^*_{d,acs}$	81,09	20,66	42,13	41,46	74,81	42,64	33,71	63,37	58,97	38,33	54,88
$L^*_{d,ers}$	78,11	25,35	44,82	37,73	77,77	35,52	37,38	52,54	70,25	36,41	51,25
$L^*_{d,acs} - L^*_{d,ers}$	2,97	-4,69	-2,69	3,72	-2,96	7,13	-3,67	10,83	-11,28	1,92	3,63
U	272	5	308	3217	73	107	2312	2284	49***	435	1935,5**
sig.	,191	,280	,628	,068	,156	,152	,690	,409	,000	,234	,002

a: para *blanco* se tomaron los aciertos y errores definidos según el criterio estricto para definir los aciertos (no existieron errores según el criterio laxo).

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

Para evaluar de forma más exhaustiva el Modelo A de predicción de errores, se llevó a cabo un análisis posterior para comprobar si las diferencias encontradas eran una consecuencia de las características colorimétricas de la muestra de colores de superficie empleada. Concretamente, se determinaron cuáles eran los errores esperados para cada categoría y se compararon con los errores reales cometidos, de acuerdo al siguiente procedimiento:

1. Para determinar qué estímulos eran errores esperables para una determinada categoría, así como el grado en el que se esperaba esta confusión (en términos de probabilidad), en primer lugar se partió de los aciertos obtenidos ante dicha categoría por cada grupo de observadores (protanopes y deuteranopes). Se consideró que eran **errores esperados** aquellos estímulos que cumplieran los dos requisitos siguientes: 1) su línea de confusión tuviera una pendiente (parámetro a) comprendida en el rango de pendientes de confusión de los aciertos, y 2) su claridad transformada (L^*_p o L^*_d) estuviera comprendida en el rango de claridades transformadas de los aciertos.
2. En segundo lugar se representó la frecuencia de selección de los aciertos en función de cada una de las **dos dimensiones colorimétricas relevantes** según un modelo de visión dicrómata estándar, en lugar de las tres dimensiones necesarias para tricrómatas normales. La naturaleza de estas dimensiones se explicará más abajo.
3. En tercer lugar, se llevó a cabo un procedimiento de **ajuste de funciones polinómicas** para modelar la relación existente entre la frecuencia de selección de los aciertos y cada una de dichas dimensiones.
4. Por último, las funciones ajustadas se utilizaron para determinar un peso determinado, mediante **interpolación**, para el subconjunto de estímulos de la muestra identificados previamente como errores esperados, en función de su valor en las dos dimensiones relevantes. (El valor promedio de R^2 a través de las once categorías, tomando la frecuencia de selección empírica y ajustada de los aciertos, fue igual a 0,73 y 0,75 para protanopes y deuteranopes, respectivamente, comprendiendo un rango entre 0,96 (*azul*) y 0,52 (*morado*) en deuteranopes, y entre 0,87 (*negro*) y 0,58 (*blanco*) en protanopes).
5. Como **dimensiones relevantes**, se emplearon: 1) la estimación de la caridad transformada (protanope o deuteranope), tal y como se ha descrito anteriormente, y 2) una estimación de la saturación (protanope o deuteranope). Esta última se realizó a partir de la intersección de la línea de confusión del estímulo de interés y una de las dos líneas definidas por el punto acromático y las coordenadas cromáticas correspondientes a 575 nm o 475 nm. La estimación de la saturación dicrómata es simplemente la distancia entre esta intersección y el punto acromático. Este procedimiento permite realizar una transformación

análoga a la del modelo de apariencia del color en dicrómatas propuesto por Brettel, Viènot y Mollon (1997).

De esta manera, estímulos cuya línea de confusión tenga una pendiente muy parecida a la del prototipo de la CCB target y además tengan una claridad transformada también muy parecida, reciben pesos muy elevados, y por lo tanto se esperan muchos errores ante ellos, mientras que a medida que el estímulo se aleje del prototipo en cualquiera de estas dos dimensiones el peso otorgado disminuye. Este procedimiento permite expresar la magnitud con la que se espera un error de forma cuantitativa, en lugar de dicotómica (error esperado vs. error no esperado), como habíamos hecho en trabajos previos (Lillo, Davies et al., 2001, Lillo, Vitini et al., 2001). Hasta donde conocemos, es la primera vez que se expone un procedimiento como el descrito para estimar la magnitud de errores esperados en observadores dicrómatas en la denominación de color.

A modo de ejemplo, la Figura 6.14 representa, para las categorías *amarillo* (12A, protanopes, 6.14B, deuteranopes) y *azul* (12C, protanopes, 6.14D, deuteranopes), junto con los estímulos seleccionados empíricamente por tricrómatas normales, protanopes, y deuteranopes, los estímulos definidos como errores esperados para estas categorías y para ambos tipos de dicrómatas según el procedimiento descrito. Los errores esperados se representan mediante cuadrados, codificando mediante el tamaño el grado de confusión esperada, computado de acuerdo al procedimiento descrito (la frecuencia de los errores esperados se calculó a partir de la multiplicación del número de observadores del grupo de dicrómatas correspondiente por la probabilidad asignada según el procedimiento descrito). En la Figura 6.14 puede observarse con nitidez que los errores esperados se alejan de la tendencia central de las pendientes de los aciertos (línea continua), y sin embargo se concentran en torno a la tendencia central de las pendientes de los errores (línea discontinua).

Las Tablas 6.24 y 6.25 resumen los resultados de los análisis estadísticos efectuados para comparar las características colorimétricas de los errores cometidos y los errores esperados.

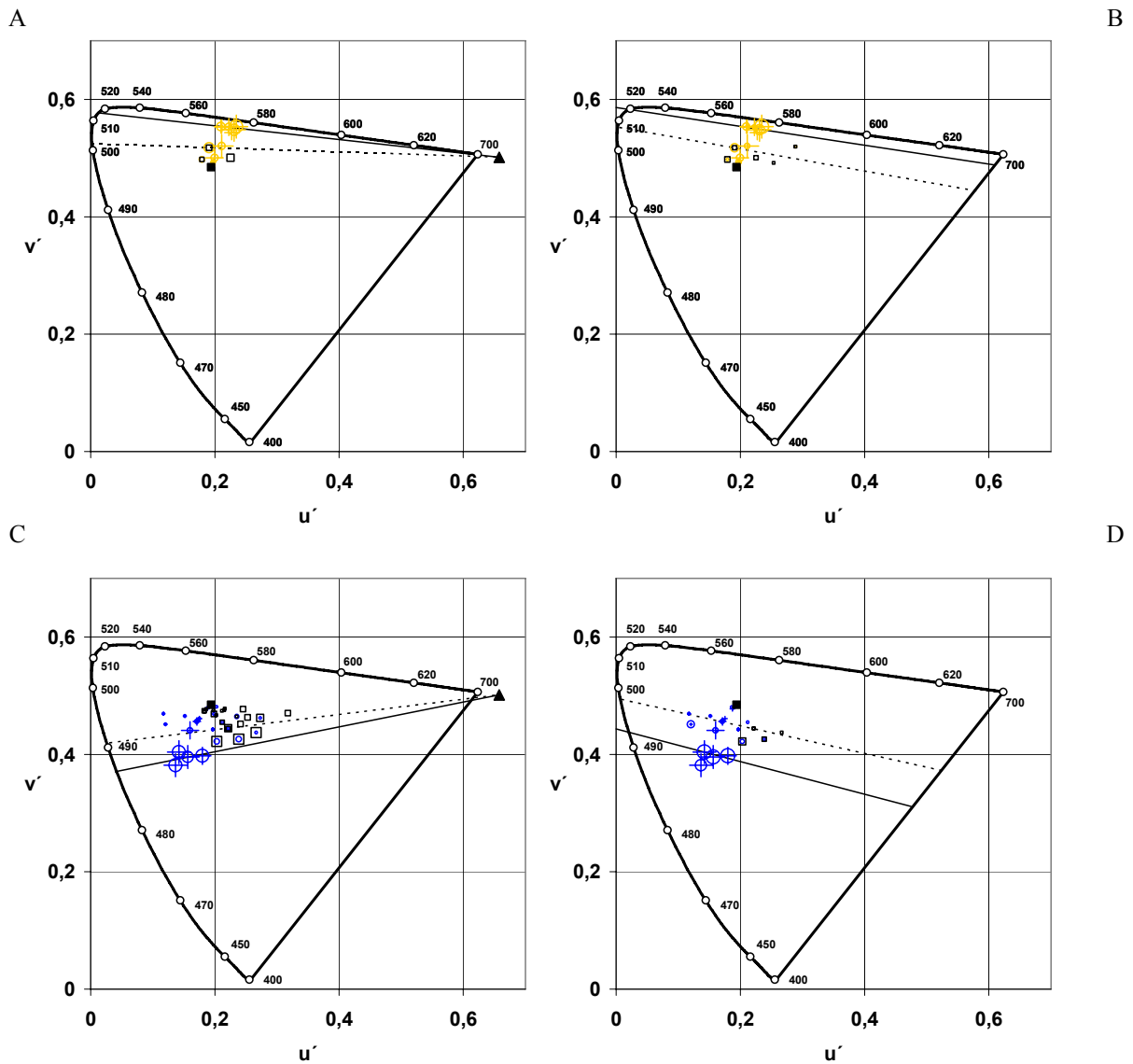


Figura 6.14. Estímulos seleccionados por tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores para amarillo y azul, y errores esperados para protanopes y deuteranopes. A: Amarillo protanopes. B: Amarillo deuteranopes. C: Azul protanopes. D: Azul deuteranopes. Se muestra la misma información que en las Figuras 6.12E, 6.12F, 6.13E y 6.13F, pero incluyendo la representación de los errores esperados (cuadrados) para las categorías correspondientes según el Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada (a mayor tamaño, mayor frecuencia esperada: más detalles en el texto).

Respecto al parámetro a , puede comprobarse que, en el caso de los protanopes (Tabla 6.24), únicamente existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) para la categoría *naranja*. Esto contrasta ampliamente con el patrón de resultados encontrados al comparar los aciertos con los errores cometidos (Tabla 6.22), que arrojaba diferencias significativas para *blanco*, *amarillo*, *azul*, y *gris*, además de para *naranja*. En deuteranopes (Tabla 6.25), se encontraron diferencias significativas para *marrón* y *rosa*. Nuevamente, recuérdese que la comparación entre aciertos y errores, además de resultar significativa para estas dos categorías, también lo fue para *amarillo*, y *azul* (Tabla 6.23).

Tabla 6.24. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de errores cometidos y errores esperados en protanopes en la tarea de mapa de colores. Se muestra la mediana de la distribución del parámetro a (pendiente de la línea de confusión) para los errores cometidos ($a_{p,ers}$) y los esperados ($a_{p,ers}^*$), así como la mediana de la distribución de la claridad protanope para los errores cometidos ($L_{p,ers}^*$) y los esperados ($L_{p,ers}^*$). U: valor del estadístico de contraste. Los asteriscos resaltan los contrastes estadísticamente significativos (también se indica el valor de la significación exacta, sig.). Entre paréntesis se muestra el número de errores cometidos o esperados correspondiente.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
$a_{p,ers}$	46,09 (2)	52,72 (10)	-47,98 (58)	-44 (165)	1,67 (12)	164,48 (30)	-34,24 (40)	58,83 (99)	-86,36 (38)	155,05 (10)	59,47 (63)
$a_{p,ers}$	7,78 (2)	24,77 (2)	-52,36 (20)	-38,27 (48)	-35,28 (9)	130,67 (19)	-12,73 (29)	43,66 (62)	-109,93 (40)	155,05 (18)	58,83 (46)
$a_{p,ers} - a_{p,ers}$	38,32	27,98	4,38	-5,73	36,95	33,80	-21,51	15,17	23,57	0	0,64
U	0	3,5	491	3842	43,5	215	503	2978,5	279,5***	68,5	1271,5
sig.	,333	,212	,310	,755	,415	,150	,351	,754	,000	,299	,277
$L_{p,ers}^*$	67,91	29,84	31,69	38,66	79,26	36,42	30,65	51,31	42,15	49,25	55,96
$L_{p,ers}$	80,87	24,13	28,92	41,13	79,26	38,62	36,38	56,73	59,26	26,22	55,96
$L_{p,ers}^* - L_{p,ers}$	-12,96	5,71	2,77	-2,47	0	-2,19	-5,73	-5,42	-17,11	23,03	0
U	0	1,5	496	3709	34,5	216	478	1903,5***	431,5***	48,5*	1410,5
sig.	,333	,091	,338	,506	,150	,157	,216	,000	,001	,040	,815

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

Tabla 6.25. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de errores cometidos y errores esperados en deuteranopes en la tarea de mapa de colores. Se muestra la mediana de la distribución del parámetro a (pendiente de la línea de confusión) para los errores cometidos ($a_{d,ers}$) y los esperados ($a_{d,ers}^*$), así como la mediana de la distribución de la claridad deuteranope para los errores cometidos ($L_{d,ers}^*$) y los esperados ($L_{d,ers}^*$). U: valor del estadístico de contraste. Los asteriscos muestran los contrastes estadísticamente significativos (también se indica el valor de la significación exacta, sig.). Entre paréntesis se muestra el número de errores cometidos o esperados correspondiente.

	B ^a	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
$a_{d,ers}$	-213,10 (1)	-212,14 (10)	-175,49 (51)	-195,47 (355)	-195,47 (13)	-245,06 (11)	-183,66 (52)	-213,48 (67)	-160,30 (32)	-220,39 (40)	-214,23 (110)
$a_{d,ers}$	-211,10 (17)	-200,08 (1)	-170,88 (13)	-204,61 (88)	-188,05 (7)	-235,33 (7)	-200,08 (56)	-217,82 (71)	-161,83 (8)	-215,22 (23)	-214,71 (69)
$a_{d,ers} - a_{d,ers}$	2,00	-12,05	-4,61	9,13	-7,43	-9,74	16,42	4,33	1,53	-5,16	0,47
U	0	0	216,5	14202,5	24	24	915,5***	1582***	119	453	3523,5
Sig.	0,111	,182	,053	,187	,075	,173	,001	,001	,769	,924	,422
$L_{d,ers}^*$	67,64	30,68	44,82	42,13	77,77	35,52	38,11	52,54	61,20	43,77	63,54
$L_{d,ers}$	78,11	25,35	44,82	37,73	77,77	35,52	37,38	52,54	70,25	36,41	51,25
$L_{d,ers}^* - L_{d,ers}$	10,47	5,33	0	4,39	0	0	0,72	0	-9,05	7,36	12,30
U	0	0	317,5	13371,5*	42	37	1225,5	2267	45**	326	2433,5***
sig.	0,111	,182	,820	,036	,809	,888	,156	,636	,003	,055	,000

a: para *blanco* se tomaron los errores definidos según el criterio estricto para definir los aciertos (no existieron errores según el criterio laxo).

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

En cuanto a la claridad transformada, puede verse que en el caso de los protanopes se dieron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) para *rosa*, *naranja* y *morado* (Tabla 6.24). Al comparar aciertos y errores cometidos (Tabla 6.22), además de para estas dos últimas categorías, también existieron diferencias

significativas para *verde*, *amarillo*, y *marrón*. Por último, en el caso de los deuteranopes, existieron diferencias estadísticamente significativas para *naranja*, *gris* y *verde* (Tabla 6.25), lo que supone, en contra del patrón general comentado anteriormente, un incremento con respecto a las categorías para las cuales se dieron diferencias significativas al comparar aciertos y errores cometidos (Tabla 6.23), ya que en este caso únicamente se encontraron tales diferencias para *naranja* y *gris*.

A continuación se evaluará, a partir de los datos obtenidos en la tarea de mapa de colores, la validez del **Modelo B** o modelo de predicción de errores (basado en líneas de confusión y claridad transformada) incluyendo discriminación residual *rojo-verde*. Las predicciones derivadas del Modelo A que han servido para establecer cuáles, y en qué grado, eran los errores esperados para cada categoría, no han tenido en cuenta ningún tipo de discriminación residual *rojo-verde*. Partiendo del cómputo de dichos errores esperados, examinaremos cómo la discrepancia sistemática entre estos y los datos indica de forma inexorable la necesidad de incluir cierto grado de discriminación *rojo-verde* residual en el modelo de predicción de errores en daltónicos dicrómatas.

En primer lugar, una inspección visual detallada de la Figura 6.15, que representa los resultados obtenidos para *verde*, revela un dato importante: puede verse con claridad que no hay una coincidencia entre la frecuencia empírica de selección de errores (círculos sin cruces) y la frecuencia esperada, computada a partir de las predicciones del Modelo A (cuadrados). Concretamente: tanto para protanopes (Figura 6.15A) como para deuteranopes (13B), a pesar de que no existieron diferencias estadísticamente significativas entre las pendientes de las líneas de confusión (parámetro a) de aciertos y errores (Tablas 6.22 y 22), ni tampoco entre las de errores reales y esperados (Tablas 6.24 y 6.25), los errores empíricos se concentran en las cercanías de la superficie acotada por las coordenadas cromáticas de la categoría *verde* (cruces), y son prácticamente inexistentes en el otro extremo del diagrama. Y esto es así a pesar de que hay numerosos estímulos para los que la frecuencia esperada de los errores es muy elevada (cuadrados de gran tamaño). Es decir, existen muchos estímulos altamente compatibles en términos de pendiente de confusión y claridad transformada, las dos variables relevantes a partir de las cuales el Modelo A predice la existencia de errores, y que sin embargo no son seleccionados por los daltónicos dicrómatas.

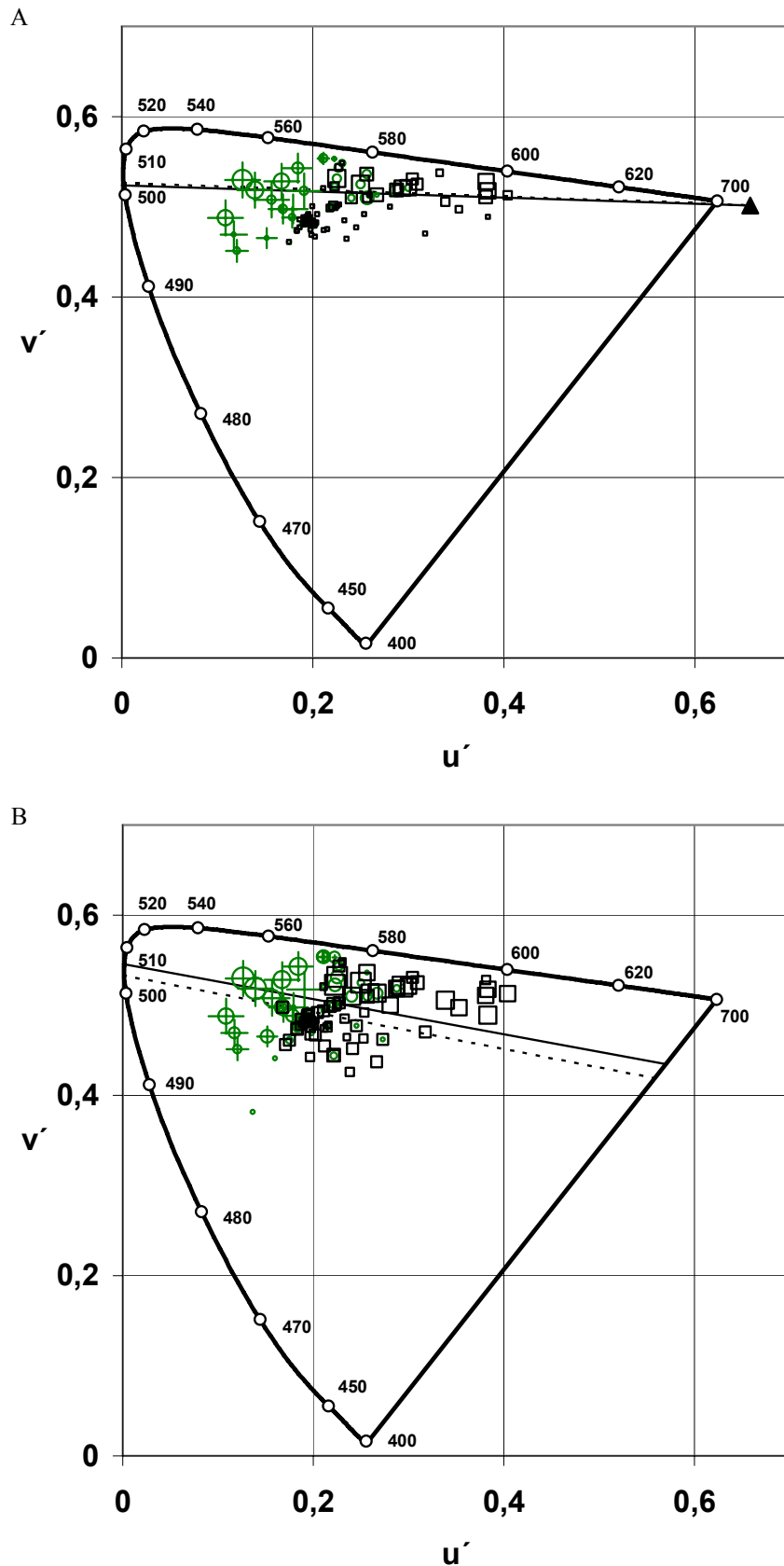


Figura 6.15. Estímulos seleccionados por tricrómatas normales, protanopes y deuteranopes como pertenecientes a la categoría verde en la tarea de mapa de colores. A: protanopes. B: deuteranopes. Se muestra la misma información que en las Figuras 6.12D y 6.13D pero incluyendo la representación de los errores esperados (cuadrados) para verde según el Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada (a mayor tamaño, mayor frecuencia esperada: más detalles en el texto).

En segundo lugar, las Tablas 6.26.1 (protanopes) y 6.26.2 (deuteranopes) muestran sendas **matrices de confusión** que enfatizan, en términos no sólo **cuantitativos** sino también **categoricos**, este patrón de resultados. Centrémonos en la comparación entre estas matrices y las obtenidas empíricamente, recogidas en el Anexo I (Tablas AI.1.1 y AI.1.2).

Para comenzar, lo primero que llama la atención, observando las diagonales de las matrices de confusión correspondientes, es que, para todas las categorías, el Modelo A predice un porcentaje de aciertos menor del que se registra a nivel empírico (con las únicas excepciones siguientes: *morado* para protanopes, y *marrón* para deuteranopes, casos en los que el Modelo A predice un porcentaje de aciertos ligeramente superior al empírico).

En términos generales, y a pesar de la sobreestimación del número de errores, existe una clara relación entre el número de errores predicho a partir del Modelo A y el obtenido empíricamente a través de todas las categorías: se obtuvo un coeficiente de correlación de 0,78 para protanopes y de 0,77 para deuteranopes. Sin embargo, las pruebas estadísticas de bondad de ajuste confirmaron que, para muchas categorías, el Modelo A predice muchos menos aciertos (y por consiguiente muchos más errores) de los realmente registrados.

Concretamente, examinando las diferencias estadísticamente significativas para las distintas categorías, el Modelo A predice un número de errores mayor que el registrado empíricamente para seis de las once categorías en protanopes (*negro*, *rojo*, *verde*, *azul*, *gris*, $p < 0,001$, y *rosa* $p < 0,01$) y para siete de las once en deuteranopes (*rojo*, *verde*, *naranja*, $p < 0,001$, *negro*, *gris*, $p < 0,01$, *amarillo*, y *morado* $p < 0,05$). En resumen, en todos los casos, las diferencias estadísticamente significativas indicaron que el número empírico de errores fue menor del predicho por el Modelo A (nótese que en los casos en los que el Modelo A predice un porcentaje de aciertos ligeramente superior al empírico, *morado* para protanopes, y *marrón* para deuteranopes, las diferencias no fueron estadísticamente significativas: $p = 0,586$ y $p = 0,342$, respectivamente). Los valores concretos del estadístico de contraste χ^2 pueden consultarse en la Tabla 6.31.

Esta infraestimación del porcentaje de aciertos es máxima para las categorías *verde* y *rojo*: el porcentaje de aciertos para *verde* es 2,56 (protanopes) y 2,73 (deuteranopes) veces mayor que el que se predice a partir del Modelo A, y para *rojo* es 1,89 (protanopes) y 1,75 (deuteranopes) veces mayor.

Y lo que es más importante: la distribución de los errores es muy diferente si se comparan las predicciones y los datos empíricos. En el caso de los protanopes, para *rojo*, se predice un porcentaje de errores con *marrón* 1,89 veces superior al registrado realmente, sobreestimación que alcanza su máximo en el caso de los errores que se predicen con *verde*, 4,57 veces más de los producidos realmente. Por su parte, respecto al uso de *rojo* en deuteranopes, el Modelo A predice un porcentaje de errores con *marrón* 3,51 veces superior al empírico, y con *verde*, 9,06 veces más.

Algo muy similar ocurre para *verde* (consúltase de nuevo la Figura 6.15). En lo que respecta a esta categoría en el caso de los protanopes, el Modelo A predice un porcentaje de errores con *marrón* prácticamente idéntico al que de hecho se produce empíricamente. Sin embargo, predice 8,73 veces más errores con *naranja* de los que realmente se producen, y mientras que predice un porcentaje de errores con *rojo* igual a 14,55%, a nivel empírico no se registró ni un solo error de esta naturaleza. En el caso del uso de *verde* por parte de los deuteranopes, el Modelo A también predice un porcentaje de errores con *marrón* prácticamente idéntico al que de hecho se produce empíricamente. Sin embargo, mientras que predice un 7,33% de errores con *naranja*, este error no se registró a nivel empírico, y mientras que predice un porcentaje de errores con *rojo* igual a 11,17%, a nivel empírico sólo se registró un porcentaje de 0,05% de confusiones de este tipo.

Tabla 6.26.1. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB a partir del Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	90,00										8,57	1,43
N		68,75	11,68					3,16		13,89		2,53
R			31,76	11,78			53,58					2,88
V			14,55	20,29	3,60		34,91	3,34	15,14		4,45	3,71
Am				19,99	72,73				5,20			2,08
Az						46,43				50,41		3,16
Mar			21,89	13,41			61,54					3,16
Ros				15,33				37,34		17,79	23,78	5,75
Nar				21,79	5,59		22,63		50,00			0,00
Mor						21,32				75,61		3,07
Gri				12,26				22,49		16,32	41,67	7,27

Tabla 6.26.2. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en deuteranopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB a partir del Modelo A de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	97,96											2,04
N		83,61								14,34		2,05
R			45,74	13,10			35,08		5,14			0,94
V		5,69	11,17	18,20			26,47	6,23	7,33	13,30	7,86	3,76
Am				20,55	64,86			7,96	6,63			0,00
Az						80,00				19,75		0,25
Mar			15,34	16,68			64,38					3,60
Ros				10,82			7,04	41,74		8,47	30,49	1,44
Nar				12,56	27,22		5,29		54,93			0,00
Mor		4,75		22,37			7,07			52,94	11,08	1,79
Gri	7,90			7,43				23,02		16,73	41,18	3,74

Antes de continuar examinando las pruebas de discriminación *rojo-verde* residual, recordemos que en el apartado anterior se mencionó un resultado muy interesante acerca de la asimetría de los errores existente en algunos pares de categorías. En breve: se hizo explícito que las matrices que resumen el porcentaje de aciertos y errores no eran simétricas (es decir, para algunos pares de categorías, el porcentaje de error asociado a la búsqueda de uno de los miembros del par era diferente del porcentaje de error asociado a la búsqueda del otro).

A partir de la comparación entre las predicciones del Modelo A, tal y como estas se concretan en las Tablas 6.26.1-6.26.2, y los resultados empíricos recogidos en las Tablas AI.1.1-AI.1.2, puede concluirse un hecho muy revelador: para la mayoría de las asimetrías destacadas registradas a nivel empírico, su naturaleza coincide con lo esperable a partir de las predicciones del Modelo A.

Por ejemplo, a partir del Modelo A esperaríamos que en el caso de los protanopes (Tabla 6.26.1) el porcentaje de error debido a la selección de estímulos “*verdes*” cuando se están buscando ejemplares de *amarillo*, fuese muy superior a porcentaje de error debido a la selección de estímulos “*amarillos*” al buscar ejemplares de *verde* (concretamente, 19,99% vs. 3,60%). Y esto es exactamente lo que ocurre a nivel empírico (20,45% vs. 4,49%, consúltase la Tabla AI.1.1).

En el caso de los protanopes, para ocho de las diez asimetrías reflejadas en la Tabla AI.3 que muestran un desequilibrio cercano o superior al 5%, el sentido de dicha asimetría coincidió con el esperable a partir del Modelo A: *rojo-marrón*, *rosa-morado*, *verde-amarillo*, *verde-gris*, *verde-marrón*, *marrón-naranja*, *rosa-gris*, y *morado-gris*. Únicamente las asimetrías que se dieron con los pares *amarillo-naranja* y *blanco-rosa* no son predecibles a partir de dicho modelo.

En el caso de los deuteranopes, para nueve de las trece asimetrías reflejadas en la Tabla AI.3 que muestran un desequilibrio superior al 5%, el sentido de dicha asimetría coincidió con el esperable a partir del Modelo A: *rosa-morado*, *rosa-gris*, *verde-amarillo*, *morado-gris*, *rojo-naranja*, *amarillo-naranja*, *verde-marrón*, *rojo-marrón*, y *negro-verde*. Para tres de los pares en los que se produjeron asimetrías, estas no se esperarían a partir del Modelo A (*negro-marrón*, *naranja-morado* y *verde-gris*), y únicamente en un caso la asimetría se produjo en el sentido contrario (*negro-morado*).

En tercer lugar, una forma más gráfica de constatar la existencia de cierta discriminación *rojo-verde* residual puede observarse en la Figura 6.16, confeccionada a partir del cómputo de los **centroides** de las CCB cromáticas, cuyas coordenadas aparecen en la Tabla 26 (junto con los de las CCB acromáticas). En la Figura 6.16A se representan los centroides de dichas categorías correspondientes al grupo de tricrómatas normales. En las Figuras 6.16B (protanopes) y 6.16D (deuteranopes) se representan los centroides computados a partir de los estímulos compatibles según el Modelo A, es decir, tanto aciertos como errores esperados, ponderados según la frecuencia establecida por la aplicación de dicho modelo conforme al procedimiento descrito anteriormente.

Como puede verse, existe un clarísimo efecto de compresión de la dimensión *rojo-verde*, de forma que la localización de los centroides tiende a colapsar en torno a una línea en el diagrama de cromaticidad, aunque debido a las características colorimétricas de los colores de superficie y de la muestra del presente estudio, la reducción a una única dimensión en el diagrama no es perfecta. El caso más claro es el centroide de *amarillo*: puesto que el uso de este término está ligado a claridades altas, su localización tras la eliminación del mecanismo *rojo-verde* apenas varía, puesto que, como puede constatarse observando las Figuras 6.14A y 6.14B, hay muy pocos errores esperados (cuadrados) para *amarillo*, y todos se concentran en las inmediaciones de la posición que ocupa dicha categoría en el diagrama. Algo muy diferente ocurre para otros centroides. Especial atención deben recibir los computados para *rojo* y *verde*. Obsérvese cómo la distancia entre ellos se ha reducido radicalmente tras la aplicación del Modelo A (y como consecuencia también lo ha hecho su distancia al centroide de *marrón*). Ello se debe a que para estos TCB sí que existe un amplio número de errores esperados, en contraposición a lo que ocurría para *amarillo*.

Las Figuras 6.16C (protanopes) y 6.16E (deuteranopes) representan los centroides obtenidos a nivel empírico. Puede observarse claramente que, aunque existe cierta compresión con respecto al caso de los tricrómatas normales (Figura 6.16A), en ningún caso esta es tan acusada como la que se esperaría a partir del Modelo A (Figuras 6.16B y 6.16D).

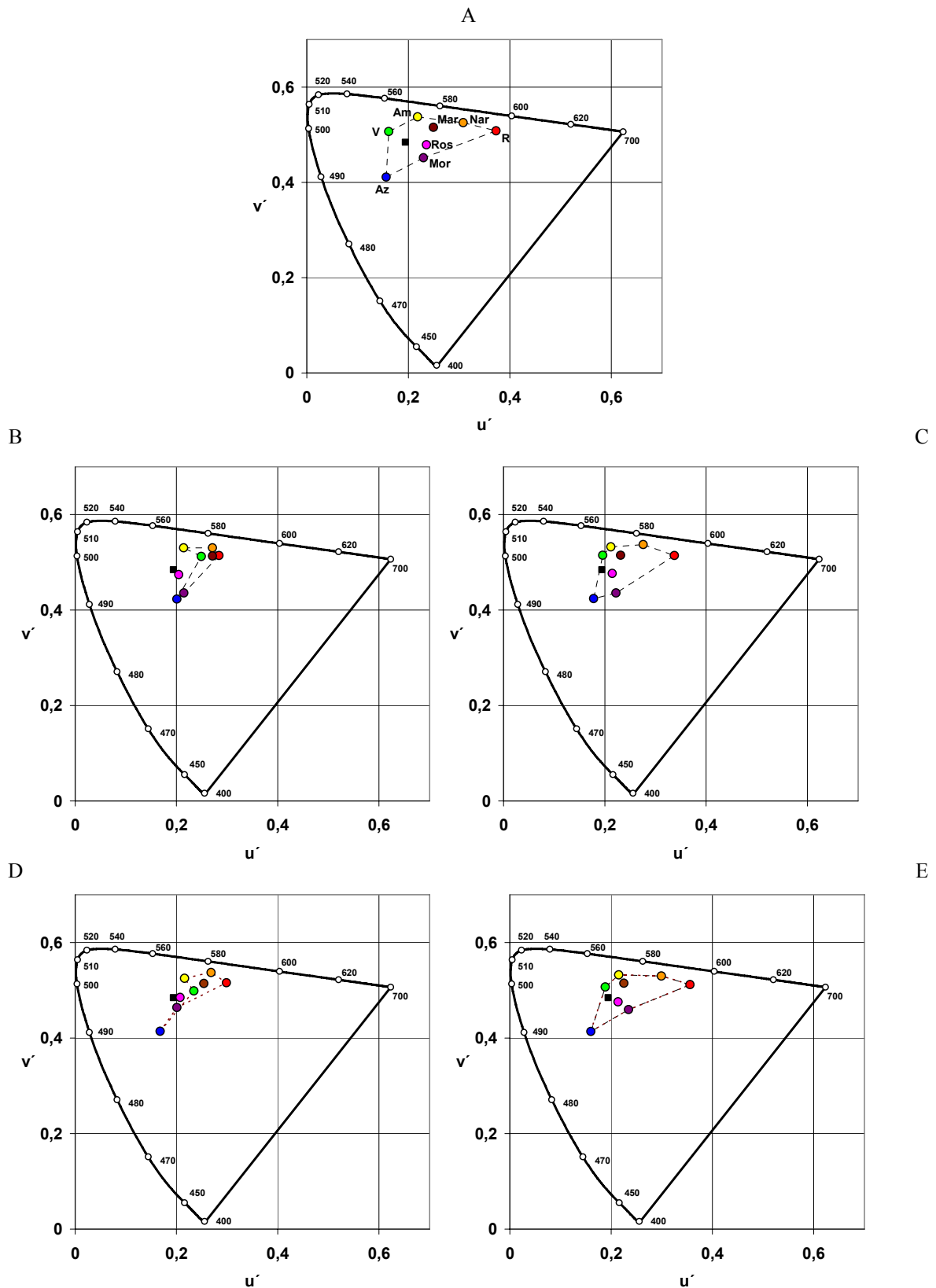


Figura 6.16. Representación de las coordenadas cromáticas de los centroides de las CCB cromáticas en el diagrama CIE $u'v'$ 1976-1. A: Centroides empíricos del grupo de tricrómatas normales. B: Centroides computados para protanopes a partir de las predicciones del Modelo A. C: Centroides empíricos del grupo de protanopes. D: Centroides computados para deuteranopes a partir de las predicciones del Modelo A. E: Centroides empíricos del grupo de deuteranopes. Las coordenadas en el espacio CIELUV de los centroides pueden consultarse en las Tablas 6.27.1 y 6.27.2 (las coordenadas cromáticas $u'v'$ representadas en esta figura se computaron a partir de dichas coordenadas).

Tabla 6.27.1. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por tricrómatas normales y protanopes, y centroides computados para protanopes a partir de las predicciones del Modelo A. ΔE^*_{uv1} : distancia CIELUV entre los centroides de las CCB en TN (tricrómatas normales) y los centroides computados para protanopes a partir de las predicciones del Modelo A. ΔE^*_{uv2} : distancia CIELUV entre los centroides empíricos de tricrómatas normales y protanopes. Dif.: diferencia existente entre las dos distancias anteriores.

	TN			Modelo A				Empírico				Dif.
	L*	u*	v*	L*	u*	v*	ΔE^*_{uv1}	L*	u*	v*	ΔE^*_{uv2}	
B	83,57	0,71	0,42	80,71	1,91	-1,35	3,56	81,84	1,78	-0,04	2,08	1,48
N	22,10	-2,15	0,38	25,67	13,13	-0,09	15,71	21,94	0,05	0,51	2,22	13,49
R	39,73	92,35	12,32	34,38	40,16	13,32	52,47	37,88	70,67	14,80	21,90	30,57
V	49,62	-21,05	14,53	45,10	32,41	16,35	53,68	44,79	0,93	17,77	22,74	30,94
Am	70,54	22,53	48,98	73,10	19,30	43,78	6,64	73,68	17,15	45,80	7,00	-0,36
Az	37,79	-18,44	-35,82	37,08	3,32	-29,49	22,67	39,91	-8,35	-31,38	11,23	11,44
Mar	37,68	27,12	15,35	35,12	35,20	13,27	8,72	34,52	16,74	13,56	11,00	-2,28
Ros	61,44	33,54	-4,28	51,80	7,10	-7,00	28,27	59,32	15,93	-5,99	17,82	10,46
Nar	56,61	84,24	30,09	50,94	51,09	30,41	33,63	56,60	60,05	38,65	25,66	7,97
Mor	40,75	18,94	-17,35	37,64	10,15	-23,73	11,30	34,44	12,56	-21,71	9,98	1,32
Gri	59,66	-2,34	-0,96	54,55	4,63	-5,36	9,69	53,31	-4,41	-3,84	7,27	2,42

Tabla 6.27.2. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por tricrómatas normales y deuteranopes, y centroides computados para deuteranopes a partir de las predicciones del Modelo A. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.27.1 pero comparando los centroides de TN y deuteranopes.

	TN			Modelo A				Empírico				Dif.
	L*	u*	v*	L*	u*	v*	ΔE^*_{uv1}	L*	u*	v*	ΔE^*_{uv2}	
B	83,57	0,71	0,42	82,24	1,87	-0,49	1,98	81,93	2,44	-0,45	2,53	-0,56
N	22,10	-2,15	0,38	23,25	0,22	-1,10	3,02	21,62	-2,98	0,13	0,98	2,04
R	39,73	92,35	12,32	42,04	57,36	16,99	35,37	40,48	85,09	14,39	7,59	27,79
V	49,62	-21,05	14,53	43,40	22,62	7,97	44,59	42,50	-3,18	12,35	19,36	25,23
Am	70,54	22,53	48,98	73,84	21,24	38,97	10,62	73,80	20,37	45,72	5,09	5,53
Az	37,79	-18,44	-35,82	39,00	-13,29	-35,69	5,29	38,36	-17,04	-35,28	1,60	3,69
Mar	37,68	27,12	15,35	35,50	28,30	13,59	3,04	36,05	14,63	14,25	12,65	-9,61
Ros	61,44	33,54	-4,28	56,45	10,63	-1,92	23,56	58,19	14,88	-6,68	19,09	4,47
Nar	56,61	84,24	30,09	58,24	56,34	39,86	29,61	57,76	78,87	34,02	6,76	22,86
Mor	40,75	18,94	-17,35	40,19	3,50	-10,74	16,80	38,01	20,03	-12,24	5,90	10,91
Gri	59,66	-2,34	-0,96	61,54	5,61	-3,58	8,57	56,60	-1,26	-2,86	3,76	4,81

Las Tablas 6.27.1-6.27.2 muestran, para cada categoría, las coordenadas en el espacio CIELUV de los centroides empíricos de las CCB para tricrómatas normales, protanopes (Tabla 6.27.1) y deuteranopes (Tabla 6.27.2), además de los centroides computados a partir de la aplicación del Modelo A para protanopes (Tabla 6.27.1) y deuteranopes (Tabla 6.27.2). Junto con esta información, se muestra la distancia CIELUV existente entre los centroides de las CCB en tricrómatas normales y los otros dos conjuntos de centroides: los computados a partir de las predicciones del Modelo A (esta distancia se encuentra en las Tablas en las columnas con el encabezado ΔE^*_{uv1}), y los registrados a nivel empírico (ΔE^*_{uv2}). La última columna de cada Tabla muestra la diferencia existente entre las distancias CIELUV predichas por el Modelo A y las realmente existentes ($\Delta E^*_{uv1} - \Delta E^*_{uv2}$). Comparando el promedio (a través de todas las categorías) de ΔE^*_{uv1} con el de ΔE^*_{uv2} , se observa una reducción del 43,62% para protanopes y del 53,44% para deuteranopes entre las distancias predichas y las empíricas.

Pero evidentemente, dicha reducción es mucho más pronunciada para determinados TCB. Tal y como se aprecia fácilmente en la Figura 6.16 (y a pesar de que L^* no está representada), los centroides de *rojo* y *verde* son, tanto en protanopes (Tabla 6.27.1) como en deuteranopes (Tabla 6.27.2), aquellos para los que existe una mayor diferencia entre las predicciones del Modelo A y los datos empíricos.

Como dimensión relevante para **cuantificar** la magnitud de la respuesta del mecanismo *rojo-verde* residual ante un estímulo de coordenadas u' , v' , determinado previamente como un error esperado para una CCB concreta, se definió

$$\Delta RG_{res} = \left| \sqrt{(u' - u'_c)^2 + (v' - v'_c)^2} - \sqrt{(u'_f - u'_c)^2 + (v'_f - v'_c)^2} \right|,$$

donde ΔRG_{res} es la diferencia en la actividad del mecanismo *rojo-verde* residual entre el error esperado y el prototipo de la CCB, cuyas coordenadas son u'_f , v'_f , y u'_c , v'_c son las coordenadas cromáticas del punto de confusión (protanope o deuteranope). Utilizamos esta métrica por dos razones fundamentales:

1. El cómputo de ΔRG_{res} permite aislar la actividad del mecanismo *rojo-verde* residual, descontando el efecto de la luminancia y de la actividad del mecanismo *azul-amarillo* (como se describirá a continuación).
2. Además permite especificar la magnitud del mecanismo *rojo-verde* residual en términos de distancias en un diagrama de cromaticidad, asociándola por tanto a un proceso de discriminación. Esta no es una idea nueva en la investigación sobre color, aunque nosotros la hemos adaptado aquí al tópico de las CCB (por ejemplo, los ejes mayores de las elipses de discriminación ajustadas a los datos obtenidos en observadores anómalos, convergen hacia el punto de confusión, y su longitud puede interpretarse como una medida del grado de pérdida en la capacidad de discriminación cromática, véase Regan, Reffin, y Mollon, 1994). Al hacer esto, evitamos hacer ningún tipo de asunción sobre la sensibilidad espectral de dicho mecanismo, así como recurrir a supuestos adicionales sobre su efecto en la apariencia del color (en contraposición a otros trabajos como por ejemplo el de Wachtler, Dohrmann y Hertel, 2004). En cierto sentido, supondría un intento de atrapar y cuantificar (empleando la información proporcionada

mediante las coordenadas cromáticas) la “tercera dimensión perdida”, que escapa a las dos dimensiones propuestas por los modelos de visión dicrómata estándar.

La Figura 6.17 representa la probabilidad de error en función de ΔRG_{res} . De no existir discriminación residual *rojo-verde*, la función debería ser igual a una constante. Los resultados no dejan lugar a dudas de que esto no es lo que sucede: la probabilidad de error está inversamente relacionada con ΔRG_{res} , de forma que al aumentar esta, disminuye la primera. Para aislar la actividad del mecanismo residual *rojo-verde*, en la confección de la Figura 6.17 se han tenido en cuenta únicamente estímulos cuya compatibilidad con la CCB de referencia era máxima, es decir, estímulos muy similares tanto en claridad transformada como en saturación dicrómata, y cuya discriminación por tanto únicamente puede basarse en ΔRG_{res} . Concretamente, en la Figura 6.17 únicamente se representan errores esperados con un peso igual o superior a 0,875 para protanopes y deuteranopes (los resultados para protanopes y deuteranopes por separado fueron muy similares, como se verá a continuación, por lo cual únicamente se presentan los resultados agregados).

Se ajustó una función de tipo exponencial a los datos, $p(error) = Ae^{-b\Delta RG_{res}}$ (fijando el valor $A = 1$). Se obtuvo la expresión $p(error) = e^{-10,93\Delta RG_{res}}$ ($R^2 = 0,581$; representada en la Figura 6.17 mediante la línea continua). Los mismos resultados aparecen si se tiene en cuenta únicamente aquellos errores esperados con un peso igual a 1, $p(error) = e^{-10,19\Delta RG_{res}}$ ($R^2 = 0,425$, algo menor debido a que en este caso el rango de valores de ΔRG_{res} es menor que en la Figura 6.17). El ajuste exponencial fue superior al de otro tipo de funciones. Por ejemplo, el ajuste de una función inversa como la que emplearon Cole et al., 2006 para modelar los efectos del tamaño sobre la probabilidad de error, ofrece un ajuste mucho peor a nuestros datos, $R^2 = 0,314$, y un valor asintótico igual a 0,196 que sobreestima la probabilidad de error empírico, que como puede observarse en la Figura 6.17 tiende a cero.

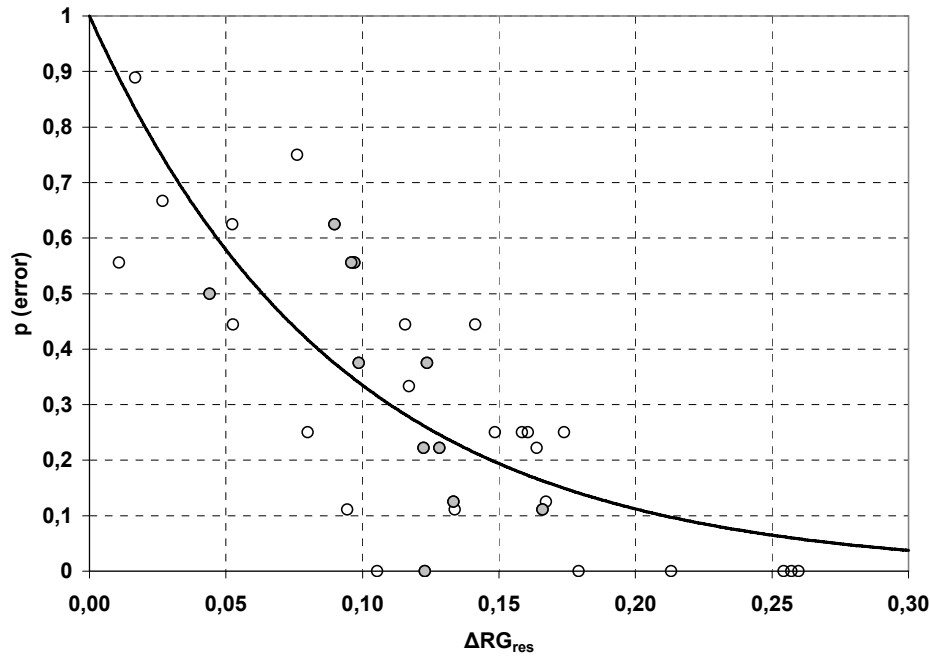


Figura 6.17. Actividad rojo-verde residual en protanopes y deuteranopes. Se representa la probabilidad de error en función de ΔRG_{res} (véase el texto para consultar los detalles). Los puntos representan errores esperados con un peso $\geq 0,875$ (los errores esperados con un peso igual a 1 se representan mediante puntos grises). La línea continua representa el ajuste de una función exponencial a los datos.

La Tabla 6.28 muestra el valor estimado del parámetro b (exponente), y el grado del ajuste (R^2), para distintas condiciones: tomando los datos provenientes de los estímulos de máxima compatibilidad, según el Modelo A, para los dos grupos de dicrómatas tomados conjuntamente, y para cada grupo por separado.

Tabla 6.28. Valor estimado del parámetro $-b$ de la función exponencial ajustada para modelar la relación entre la probabilidad de error y ΔRG_{res} . P: protanopes. D: deuteranopes. Método de estimación: Levenberg-Marquardt (los resultados no varían si se utiliza como método de estimación la programación cuadrática secuencial). Procedimiento de mínimos cuadrados. (Las estimaciones bootstrap del error típico, tomando 1000 muestras para cada simulación, así como los límites del intervalo de dichas estimaciones, tomando los percentiles 2,5 y 97,5 se muestran entre paréntesis).

Grupo (n estímulos)	Estimación	Error típico	Intervalo de confianza al 95%		R^2
			Límite inferior	Límite superior	
P y D (35)	-10,929	0,942 (0,998)	-12,843 (-13,275)	-9,015 (-9,401)	,581
P (16)	-9,879	1,031 (1,029)	-12,077 (-12,261)	-7,680 (-8,214)	,667
D (19)	-12,024	1,606 (1,877)	-15,399 (-16,806)	-8,649 (-9,357)	,550

Gracias a la cuantificación de la relación entre la probabilidad de error y ΔRG_{res} , es posible concretar formalmente las predicciones del Modelo B de la siguiente manera:

$$p(x_{D_i}) = a_{x_{D_i}} \cdot e^{-b_D \Delta RG_{res, x_{D_i}}}$$

donde $p(x_{D_i})$ es la probabilidad de que el estímulo x sea incluido dentro de la CCB i por el tipo de dicrómata D (protanope o deuteranope), $a_{x_{D_i}}$ es la compatibilidad del estímulo x con la CCB i para el tipo de dicrómata D , computada de acuerdo al Modelo A, y $\Delta RG_{res, x_{D_i}}$ es la distancia, medida a lo largo de la línea de confusión dicrómata correspondiente, entre las coordenadas cromáticas del estímulo x y el prototipo de la categoría i (la Tabla 6.28 muestra el valor estimado del parámetro b para protanopes y deuteranopes).

La característica esencial del Modelo B, comparado con el Modelo A, es que, además de las pendientes de las líneas de confusión y la claridad transformada, incluye una nueva tercera variable, ΔRG_{res} , cuyo efecto es reducir exponencialmente la probabilidad de error a medida que los estímulos se alejan del prototipo de una categoría en términos de distancia a lo largo de la línea de confusión. De esta forma, se concreta formalmente la inclusión de una estimación indirecta de la magnitud de la actividad residual *rojo-verde*.

Aplicando esta concreción del Modelo B a los datos, se obtuvieron unas nuevas predicciones para cada categoría, que se compararon con los datos empíricos, tal y como se ha descrito anteriormente con las predicciones del Modelo A.

De esta forma, se pudo contrastar cuál de los dos modelos de predicción de errores en dicrómatas se ajusta mejor a los datos. La Tabla 6.31 resume los principales resultados obtenidos, de forma que permite efectuar una rápida comparación entre el poder predictivo de ambos modelos. En dicha tabla se resalta, mediante un fondo gris, cuál de los dos se ajusta mejor a los datos empíricos en el aspecto evaluado (en el caso de que ninguno de los dos modelos se ajuste mejor, no se ha resaltado ninguna casilla). A continuación se describen detalladamente las predicciones efectuadas a partir del Modelo B y su ajuste a los datos, comparándolo con el ajuste del Modelo A.

Tabla 6.29.1. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB, a partir del Modelo B de predicción de errores basado en líneas de confusión, claridad transformada, y discriminación rojo-verde residual.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	90,00										8,57	1,43
N		88,00								7,20	4,20	0,60
R			71,05				28,95					0,00
V			3,59	51,22	3,89		25,44		7,08		6,09	2,69
Am				15,80	76,19				5,72			2,29
Az						63,41				35,91		0,68
Mar			7,36	9,16			83,12					0,36
Ros				7,39				54,63		15,80	18,65	3,53
Nar				7,48			15,52		74,51			2,49
Mor						8,61				91,18		0,21
Gri	3,35			8,33				19,60		18,69	48,91	1,12

Tabla 6.29.2. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en deuteranopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB, a partir del Modelo B de predicción de errores basado en líneas de confusión, claridad transformada, y discriminación rojo-verde residual.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	97,96											2,04
N		87,93								9,66		2,41
R			81,13				14,41					4,45
V		6,84		46,75			17,29	3,70	3,05	8,99	9,19	4,20
Am				15,00	75,00			5,83	4,17			0,00
Az						88,00				11,72		0,28
Mar			3,22	10,28			84,68					1,81
Ros				5,22			8,38	48,48		8,83	27,47	1,62
Nar				4,57	8,96				84,78			1,69
Mor		5,84		9,02			7,03			66,18	10,74	1,19
Gri	8,89			8,12				17,53		12,56	49,68	3,22

Las Tablas 6.29.1 y 6.29.2 muestran las **matrices de confusión** que concretan las predicciones del Modelo B. Dichas matrices pueden compararse con las predicciones del Modelo A (Tablas 6.26.1 y 6.26.2) y los datos empíricos (Tablas AI.1.1 y AI.1.2).

Lo primero que llama la atención es que, en comparación con las predicciones del Modelo A, el porcentaje de aciertos (diagonal principal), en general, es mucho más próximo al obtenido empíricamente. El coeficiente de correlación entre el número de errores predicho y el empírico fue igual a 0,89 (protanopes) y 0,91 (deuteranopes) (recuérdese que a partir del Modelo A se obtuvieron unos valores de r iguales a 0,78 y 0,79). En la fila correspondiente de la Tabla 6.31 se detalla el modelo de regresión lineal simple obtenido en cada caso, del que cabe destacar dos aspectos:

- 1) El valor estimado del parámetro β , la pendiente de la línea de regresión, es, con diferencia, mucho más cercano a 1 cuando las predicciones provienen del Modelo B que cuando provienen del Modelo A (de hecho el valor 1 se incluye tanto para protanopes como para deuteranopes dentro de los intervalos de confianza correspondientes). Es decir, mientras que el Modelo A sobreestimaba mucho el número de errores cometido (el valor estimado de las pendientes es mucho más bajo, indicando que se producen muchos menos errores de los que se predicen), no ocurre lo mismo con el Modelo B.
- 2) El valor de R^2 también resulta ser mayor para el Modelo B, lo que indica que este explica mayor proporción de varianza del número empírico de errores (en torno al 80%) de la que da cuenta el Modelo A (en torno al 60%).

Para confirmar que el ajuste de las predicciones derivadas del Modelo B es mejor que el de las del Modelo A, y para concretar en qué categorías se da esta superioridad, se repitió la serie de análisis de pruebas de bondad de ajuste para todas las categorías (los resultados también se resumen en la Tabla 6.31).

En clara contraposición a lo que sucede con el Modelo A, únicamente se puede rechazar la hipótesis nula de que el Modelo B predice la misma distribución de aciertos y de errores que la que de hecho se produce empíricamente, para cuatro de las once categorías en protanopes, y para dos de las once categorías en deuteranopes.

Concretamente, el Modelo B predice a un nivel estadísticamente significativo más aciertos (y por consiguiente menos errores) de los realmente registrados únicamente para *marrón*, *naranja*, *morado* ($p < 0,001$) y *gris* ($p < 0,05$) en el caso de los protanopes, y para *marrón* ($p < 0,001$) y *negro* ($p < 0,05$) en el caso de los deuteranopes. Los valores concretos del estadístico de contraste χ^2 pueden consultarse en la Tabla 6.31.

Tal y como ocurría con el Modelo A, la inmensa mayoría de las asimetrías detectadas a nivel empírico son congruentes con las predicciones del Modelo B. La única diferencia es que, en protanopes, la asimetría *rosa-gris* pasa de ser esperable, según el Modelo A, a no serlo según el Modelo B.

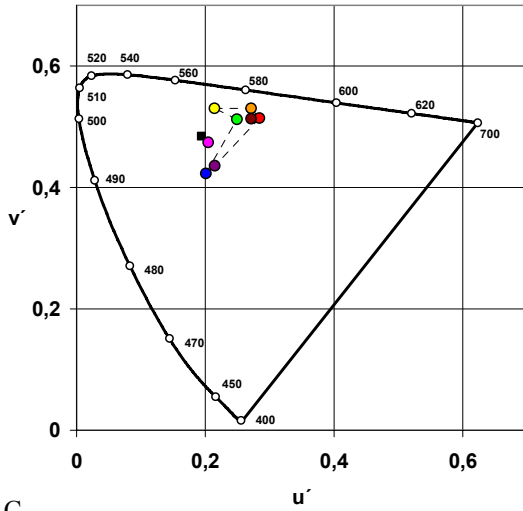
La Figura 6.18 representa gráficamente en el diagrama de cromaticidad *CIE u'v'* 1976 los **centroides** de las CCB cromáticas computados en el espacio CIELUV a partir de tres fuentes diferentes: las predicciones derivadas del Modelo A (16A: protanopes, 16B: deuteranopes), las predicciones derivadas del Modelo B (16C: protanopes; 16D: deuteranopes), y los datos empíricos (16E: protanopes; 16F: deuteranopes).

Las Tablas 6.30.1 (protanopes) y 6.30.2 (deuteranopes) muestran las coordenadas de los centroides para cada CCB. En las tres últimas columnas, se muestra la distancia CIELUV entre los centroides empíricos y los predichos, por un lado, según el Modelo A (ΔE^*_{uv1}), y, por otro lado, según el Modelo B (ΔE^*_{uv2}), así como la diferencia existente entre las dos distancias anteriores (Dif.).

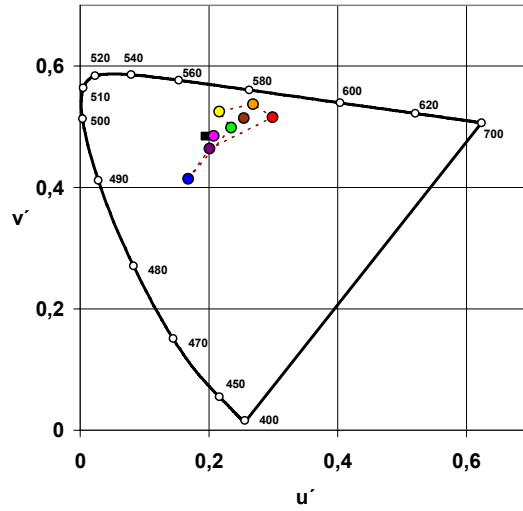
Nótese cómo a nivel gráfico, la posición de los centroides empíricos (Figuras 6.18E y 6.18F) se corresponde mucho más con la de los centroides computados a partir de las predicciones del Modelo B (Figuras 6.18C y 6.18D) que con las del Modelo A (Figuras 6.18A y 6.18B), impresión que se confirma observando las Tablas 6.30.1 y 6.30.2. Puede además verse con claridad que, para algunas categorías, la diferencia entre las predicciones de los Modelos A y B es ostensible, como por ejemplo para *rojo* y *verde*, mientras que para otras apenas si existe diferencia alguna, como por ejemplo para *amarillo*, o de hecho no existe ninguna, como ocurre con *blanco* (Tablas 6.30.1 y 6.30.2).

Para resaltar este hecho, se ha confeccionado la Tabla 6.30.3, que muestra, para cada grupo de dicrómatas, y en orden descendente, las categorías en función de $\text{Dif.} = \Delta E^*_{uv1} - \Delta E^*_{uv2}$. En términos generales, las predicciones del Modelo B acerca de la localización de los centroides fueron mucho más próximas a los datos empíricos ($\text{Dif.} > 0$) que las del Modelo A (las únicas excepciones fueron para *amarillo*, *morado* y *naranja* en protanopes). Una serie de análisis empleando la prueba estadística U de Mann-Whitney, mostró que para 6 categorías en protanopes, *negro*, *rojo*, *verde*, *azul*, *marrón* y *rosa*, y 5 en deuteranopes, *rojo*, *verde*, *naranja*, *morado* y *gris*, la localización de los centroides computados a partir de las predicciones del Modelo B, en comparación con el Modelo A, fue más parecida a la localización de los centroides empíricos, en al menos una de las dimensiones del espacio CIELUV (véanse las Tablas 6.32.1 y 6.32.2). Únicamente para *naranja* en protanopes, el patrón fue justo el inverso.

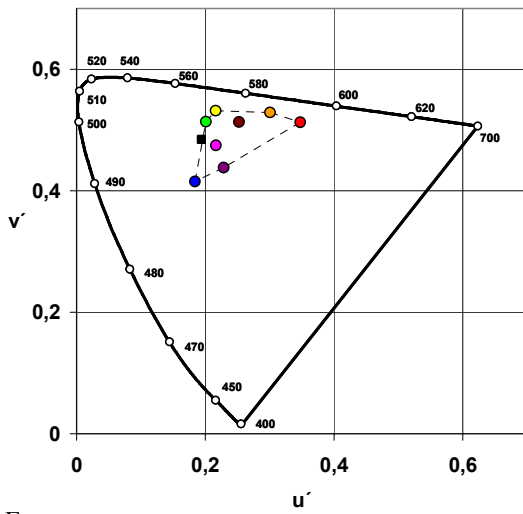
A



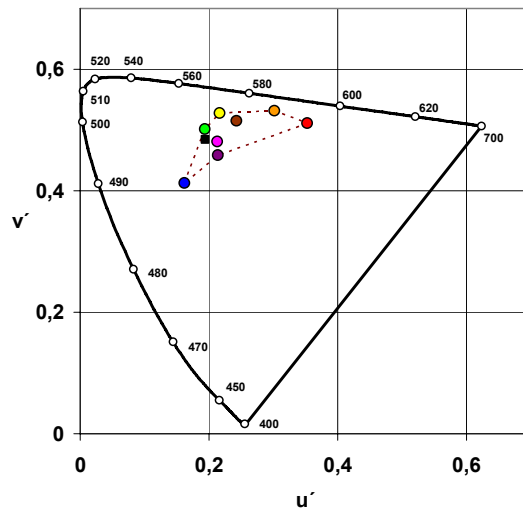
B



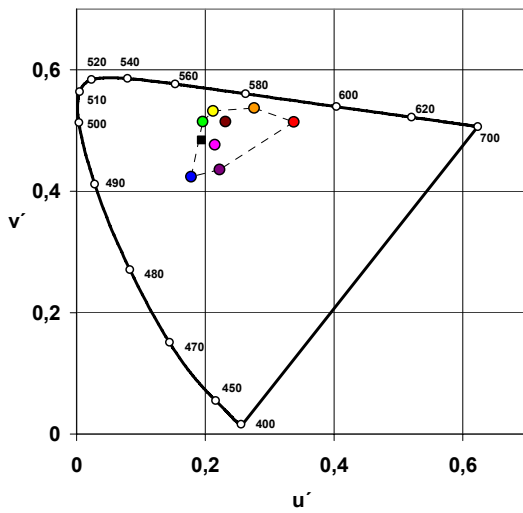
C



D



E



F

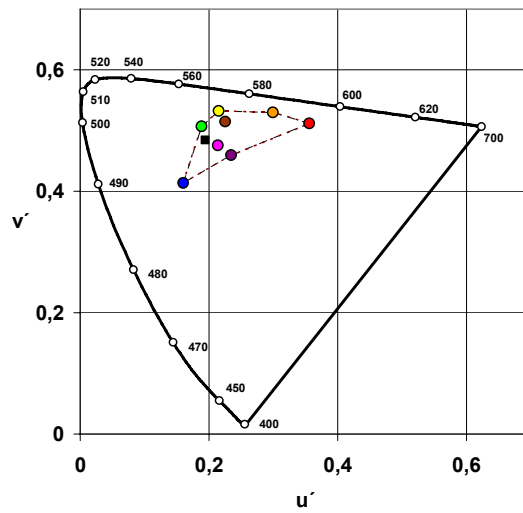


Figura 6.18. Representación de las coordenadas cromáticas de los centroides de las CCB cromáticas en el diagrama CIE $u'v'$ 1976-2. Centroides computados a partir de las predicciones del Modelo A para protanopes (A) y deuteranopes (B). Centroides computados a partir de las predicciones del Modelo B para protanopes (C) y deuteranopes (D). Centroides empíricos del grupo de protanopes (E) y deuteranopes (F).

Tabla 6.30.1. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por protanopes, y centroides computados para este grupo de observadores a partir de las predicciones de los Modelos A y B. ΔE^*_{uv1} : distancia CIELUV entre los centroides empíricos y los centroides computados a partir de las predicciones del Modelo A. ΔE^*_{uv2} : distancia CIELUV entre los centroides empíricos y los centroides computados a partir de las predicciones del Modelo B. Dif.: diferencia existente entre las dos distancias anteriores.

	Modelo A			Modelo B			Empírico			Distancias		
	L*	u*	v*	L*	u*	v*	L*	u*	v*	ΔE^*_{uv1}	ΔE^*_{uv2}	Dif.
B	80,71	1,91	-1,35	80,71	1,91	-1,35	81,84	1,78	-0,04	1,73	1,73	0,00
N	25,67	13,13	-0,09	22,83	-1,56	0,19	21,94	0,05	0,51	13,62	1,87	11,74
R	34,38	40,16	13,32	37,03	73,84	13,77	37,88	70,67	14,80	30,74	3,44	27,30
V	45,10	32,41	16,35	44,57	3,92	17,05	44,79	0,93	17,77	31,51	3,08	28,43
Am	73,10	19,30	43,78	72,84	20,65	44,72	73,68	17,15	45,80	3,01	3,76	-0,75
Az	37,08	3,32	-29,49	36,90	-4,78	-33,12	39,91	-8,35	-31,38	12,15	4,98	7,17
Mar	35,12	35,20	13,27	33,48	25,40	12,67	34,52	16,74	13,56	18,47	8,76	9,70
Ros	51,80	7,10	-7,00	53,65	15,73	-6,88	59,32	15,93	-5,99	11,64	5,73	5,91
Nar	50,94	51,09	30,41	52,60	72,94	30,42	56,60	60,05	38,65	13,43	15,80	-2,38
Mor	37,64	10,15	-23,73	37,53	16,71	-22,64	34,44	12,56	-21,71	4,49	5,26	-0,77
Gri	54,55	4,63	-5,36	55,46	3,59	-5,29	53,31	-4,41	-3,84	9,26	8,42	0,84

Tabla 6.30.2. Centroides de los estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores por deuteranopes, y centroides computados para este grupo de observadores a partir de las predicciones de los Modelos A y B. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.30.1 pero para deuteranopes.

	Modelo A			Modelo B			Empírico			Distancias		
	L*	u*	v*	L*	u*	v*	L*	u*	v*	ΔE^*_{uv1}	ΔE^*_{uv2}	Dif.
B	82,24	1,87	-0,49	82,24	1,87	-0,49	81,93	2,44	-0,45	0,65	0,65	0,00
N	23,25	0,22	-1,10	22,81	-1,08	-0,88	21,62	-2,98	0,13	3,79	2,45	1,34
R	42,04	57,36	16,99	41,05	84,66	14,27	40,48	85,09	14,39	27,89	0,72	27,17
V	43,40	22,62	7,97	43,99	-0,23	9,81	42,50	-3,18	12,35	26,19	4,18	22,01
Am	73,84	21,24	38,97	74,01	21,62	42,04	73,80	20,37	45,72	6,80	3,89	2,91
Az	39,00	-13,29	-35,69	39,13	-16,42	-36,43	38,36	-17,04	-35,28	3,82	1,52	2,31
Mar	35,50	28,30	13,59	34,98	22,23	13,95	36,05	14,63	14,25	13,70	7,68	6,02
Ros	56,45	10,63	-1,92	57,36	14,19	-2,61	58,19	14,88	-6,68	6,61	4,22	2,40
Nar	58,24	56,34	39,86	56,27	78,62	34,53	57,76	78,87	34,02	23,28	1,59	21,69
Mor	40,19	3,50	-10,74	39,56	10,18	-13,23	38,01	20,03	-12,24	16,75	10,02	6,73
Gri	61,54	5,61	-3,58	62,95	2,62	-2,64	56,60	-1,26	-2,86	8,49	7,44	1,05

Tabla 6.30.3. Distancias existentes entre los centroides empíricos y los predichos a partir de los Modelos A y B en protanopes y deuteranopes. Las categorías han sido dispuestas para cada grupo de dicrómatas según la diferencia encontrada entre las distancias (Dif.) en orden descendente (Tabla construida a partir de las Tablas 6.30.1 y 6.30.2).

Protanopes				Deuteranopes			
CCB	Dif.	ΔE^*_{uv}		CCB	Dif.	ΔE^*_{uv}	
		Modelo A	Modelo B			Modelo A	Modelo B
V	28,43	31,51	3,08	R	27,17	27,89	0,72
R	27,30	30,74	3,44	V	22,01	26,19	4,18
N	11,74	13,62	1,87	Nar	21,69	23,28	1,59
Mar	9,70	18,47	8,76	Mor	6,73	16,75	10,02
Az	7,17	12,15	4,98	Mar	6,02	13,70	7,68
Ros	5,91	11,64	5,73	Am	2,91	6,80	3,89
Gri	0,84	9,26	8,42	Ros	2,40	6,61	4,22
B	0,00	1,73	1,73	Az	2,31	3,82	1,52
Am	-0,75	3,01	3,76	N	1,34	3,79	2,45
Mor	-0,77	4,49	5,26	Gri	1,05	8,49	7,44
Nar	-2,38	13,43	15,80	B	0,00	0,65	0,65

Tabla 6.31. Comparación del ajuste entre de las predicciones derivadas de los Modelos A y B y los resultados obtenidos en la tarea de mapa de colores. Se compara el grado de ajuste de los modelos en relación con diferentes aspectos. Para cada comparación (fila), en caso de existir un mayor ajuste a los datos (estadísticamente significativo) por parte de algún modelo, la casilla correspondiente está resaltada en gris.

Aspecto considerado para evaluar el poder predictivo de los modelos		Protanopes		Deuteranopes	
		Modelo A	Modelo B	Modelo A	Modelo B
Relación lineal entre el nº de errores empírico (y) y predicho (x) a través de las 11 CCB		$y = 0,322x + 11,373$ $F_{(1,9)} = 14,26$ $p < ,01$ $R^2 = ,61$	$y = 0,998x + 8,131$ $F_{(1,9)} = 34,39$ $p < ,001$ $R^2 = ,79$ $\Delta R^2 = ,18$	$y = 0,252x + 14,212$ $F_{(1,9)} = 12,88$ $p < ,01$ $R^2 = ,59$	$y = 0,957x + 5,265$ $F_{(1,9)} = 43,70$ $p < ,001$ $R^2 = ,83$ $\Delta R^2 = ,24$
Pruebas estadísticas de bondad de ajuste de la distribución de aciertos y errores	B	$\chi^2 = 2,19$ n.s. (p = ,139)	$\chi^2 = 2,19$ n.s. (p = ,139)	-	-
	N	$\chi^2 = 13,72$ $p < ,001$	$\chi^2 = 2,08$ n.s. (p = ,149)	$\chi^2 = 7,56$ $p < ,01$	$\chi^2 = 4,78$ $p < ,05$
	R	$\chi^2 = 18,39$ $p < ,001$	$\chi^2 = 2,97$ n.s. (p = ,085)	$\chi^2 = 30,73$ $p < ,001$	$\chi^2 = 0,05$ n.s. (p = ,816)
	V	$\chi^2 = 62,17$ $p < ,001$	$\chi^2 = 0,02$ n.s. (p = ,876)	$\chi^2 = 116,71$ $p < ,001$	$\chi^2 = 0,62$ n.s. (p = ,431)
	Am	$\chi^2 = 1,03$ n.s. (p = ,310)	$\chi^2 = 0,273$ n.s. (p = ,601)	$\chi^2 = 5,05$ $p < ,05$	$\chi^2 = 1,03$ n.s. (p = ,309)
	Az	$\chi^2 = 11,57$ $p < ,001$	$\chi^2 = 0,63$ n.s. (p = ,429)	$\chi^2 = 1,53$ n.s. (p = ,216)	$\chi^2 = 0,07$ n.s. (p = ,787)
	Mar	$\chi^2 = 2,53$ n.s. (p = ,112)	$\chi^2 = 12,60$ $p < ,001$	$\chi^2 = 0,90$ n.s. (p = ,342)	$\chi^2 = 63,70$ $p < ,001$
	Ros	$\chi^2 = 9,11$ $p < ,01$	$\chi^2 = 0,90$ n.s. (p = ,342)	$\chi^2 = 3,62$ $p = ,057$	$\chi^2 = 0,08$ n.s. (p = ,783)
	Nar	$\chi^2 = 0,05$ n.s. (p = ,825)	$\chi^2 = 23,42$ $p < ,001$	$\chi^2 = 19,24$ $p < ,001$	$\chi^2 = 0,00$ n.s. (p = ,980)
	Mor	$\chi^2 = 0,30$ n.s. (p = ,586)	$\chi^2 = 27,92$ $p < ,001$	$\chi^2 = 5,22$ $p < ,05$	$\chi^2 = 0,01$ n.s. (p = ,931)
	Gri	$\chi^2 = 15,17$ $p < ,001$	$\chi^2 = 5,26$ $p < ,05$	$\chi^2 = 9,10$ $p < ,01$	$\chi^2 = 0,81$ n.s. (p = ,368)
Distancia entre los centroides empíricos y los predichos*	B	1,73	1,73	0,65	0,65
	N	13,62	1,87	3,79	2,45
	R	30,74	3,44	27,89	0,72
	V	31,51	3,08	26,19	4,18
	Am	3,01	3,76	6,80	3,89
	Az	12,15	4,98	3,82	1,52
	Mar	18,47	8,76	13,70	7,68
	Ros	11,64	5,73	6,61	4,22
	Nar	13,43	15,80	23,28	1,59
	Mor	4,49	5,26	16,75	10,02
	Gri	9,26	8,42	8,49	7,45
Valor de R^2 entre las matrices de confusión empíricas y las predichas		$F_{(1,119)} = 687,78$ $p < ,001$ $R^2 = ,85$	$F_{(1,119)} = 1697,13$ $p < ,001$ $R^2 = ,93$ $\Delta R^2 = ,08$	$F_{(1,119)} = 864,49$ $p < ,001$ $R^2 = ,88$	$F_{(1,119)} = 3457,30$ $p < ,001$ $R^2 = ,97$ $\Delta R^2 = ,09$

*: diferencias estadísticamente significativas en al menos una de las tres dimensiones del espacio CIELUV (véanse las Tabla 6.32.1 y 6.32.2).

-: Este análisis no se puede efectuar (según el criterio laxo los deuteranopes no cometieron errores).

Tabla 6.32.1. Resultados de los análisis efectuados en protanopes para comparar las coordenadas colorimétricas teóricas de las distintas categorías, computadas a partir de los Modelos A y B, con las obtenidas empíricamente en la tarea de mapa de colores (en el espacio CIELUV). Para cada categoría, se muestra la media de las distribuciones de las dimensiones L*, u* y v*, a partir de los estímulos seleccionados empíricamente, y a partir de las predicciones de los Modelos A y B (subíndices E, A y B). U: valor del estadístico de contraste. Los asteriscos resaltan los contrastes estadísticamente significativos (también se indica el valor de la significación exacta, sig.). Entre paréntesis se muestra el número de selecciones correspondiente. Las casillas resaltadas en gris muestran que alguno de los modelos (A o B) se ajustó mejor a los datos, puesto que para la/s dimensión/es colorimétrica/s correspondiente/s, no se encontraron diferencias significativas con los datos empíricos según dicho modelo, pero sí según el otro.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
L^*_E	81,84 (52)	21,94 (42)	37,88 (50)	44,79 (100)	73,68 (44)	39,91 (60)	34,52 (95)	59,32 (125)	56,60 (82)	34,44 (66)	53,31 (114)
L^*_A	80,71 (20)	25,67 (32)	34,38 (85)	45,10 (207)	73,10 (44)	37,08 (56)	35,12 (104)	51,80 (158)	50,94 (76)	37,64 (41)	54,55 (108)
L^*_B	80,71 (20)	22,83 (25)	37,03 (38)	44,57 (82)	72,84 (42)	36,90 (41)	33,48 (77)	53,65 (108)	52,60 (51)	37,53 (34)	55,46 (92)
L^*_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L^*_A	1,13	-3,73	3,50	-0,31	0,58	2,82	-0,60	7,52	5,66	-3,20	-1,24
U	465	490,5*	1525,5**	10202,5	900	1344,5	4584	6899,5***	1917,5***	1056	5794
sig.	,591	,045	,006	,840	,571	,063	,381	,000	,000	,056	,450
L^*_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
L^*_A	1,13	-0,89	0,85	0,22	0,84	3,01	1,04	5,66	3,99	-3,09	-2,15
L^*_B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U	465	488	901	3959,5	831,5	1007	3449,5	5236,5**	1456**	913	4672
sig.	,591	,631	,681	,692	,424	,122	,523	,003	,003	,128	,179
u^*_E	1,78	0,05	70,67	0,93	17,15	-8,35	16,74	15,93	60,05	12,56	-4,41
u^*_A	1,91	13,13	40,16	32,41	19,30	3,32	35,20	7,10	51,09	10,15	4,63
u^*_B	1,91	-1,56	73,84	3,92	20,65	-4,78	25,40	15,73	72,94	16,71	3,59
u^*_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
u^*_A	-0,13	-13,08	30,51	-31,48	-2,15	-11,67	-18,45	8,83	8,96	2,41	-9,05
U	503	519,5	1266,5***	5986,5***	894	1206,5**	3708**	7905,5**	2933,5	1301	4786**
sig.	,833	,093	,000	,000	,537	,008	,002	,004	,526	,741	,004
u^*_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
u^*_A	-0,13	1,62	-3,18	-2,99	-3,51	-3,57	-8,66	0,20	-12,89	-4,15	-8,01
u^*_B	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
U	503	514	914	4030,5	813,5	1115	3072,5	6701,5	1625*	979	4053**
sig.	,833	,888	,763	,845	,339	,427	,071	,925	,030	,299	,005
v^*_E	-0,04	0,51	14,80	17,77	45,80	-31,38	13,56	-5,99	38,65	-21,71	-3,84
v^*_A	-1,35	-0,09	13,32	16,35	43,78	-29,49	13,27	-7,00	30,41	-23,73	-5,36
v^*_B	-1,35	0,19	13,77	17,05	44,72	-33,12	12,67	-6,88	30,42	-22,64	-5,29
v^*_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v^*_A	1,31	0,60	1,48	1,42	2,02	-1,89	0,30	1,01	8,24	2,03	1,53
U	462	609,5	1941,5	10070,5	956	1575,5	4890	9112,5	2043,5***	1241	5425
sig.	,466	,494	,404	,702	,922	,565	,903	,265	,000	,475	,127
v^*_E	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
v^*_A	1,31	0,32	1,02	0,72	1,08	1,74	0,89	0,89	8,23	0,93	1,45
U	462	501	886	4097,5	907,5	1153	3541,5	6260,5	1397**	1060	4661
sig.	,466	,756	,590	,995	,888	,595	,722	,341	,001	,654	,171

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

En el Anexo II se comenta que el uso del coeficiente de correlación de Pearson para establecer el grado de parecido entre estímulos, o entre matrices que resumen la respuesta de diferentes observadores ante varios estímulos, es una estrategia habitual en la literatura especializada (consúltese por ejemplo, Paramei, Bimler y Cavonius, 1998). Sin embargo, dadas las características de la presente investigación, no hemos empleado este estadístico con anterioridad, puesto que los resultados obtenidos pueden fácilmente sobreestimar el parecido real entre estímulos o matrices (consúltese a este respecto el Anexo II).

Tabla 6.32.2. Resultados de los análisis efectuados en deuteranopes para comparar las coordenadas colorimétricas teóricas de las distintas categorías, computadas a partir de los Modelos A y B, con las obtenidas empíricamente en la tarea de mapa de colores (en el espacio CIELUV). Se muestra la misma información que en la Tabla 6.32.1 pero para deuteranopes.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
L^*_E	81,93 (58)	21,62 (50)	40,48 (65)	42,50 (175)	73,80 (39)	38,36 (53)	36,05 (142)	58,19 (141)	57,76 (53)	38,01 (69)	56,60 (148)
L^*_A	82,24 (49)	23,25 (61)	42,04 (94)	43,40 (434)	73,84 (37)	39,00 (55)	35,50 (146)	56,45 (115)	58,24 (71)	40,19 (85)	61,54 (187)
L^*_B	82,24 (49)	22,81 (58)	41,05 (53)	43,99 (169)	74,01 (32)	39,13 (50)	34,98 (111)	57,36 (49)	56,27 (46)	39,56 (68)	62,95 (155)
L^*_E	-0,31	-1,63	-1,56	-0,91	-0,04	-0,64	0,54	1,75	-0,48	-2,18	-4,94
L^*_A	1342 ,621	1245 ,093	2510 ,055	37252,5 ,713	716 ,956	1450,5 ,967	9829 ,448	7403 ,232	1639 ,220	2485,5 ,104	11365** ,005
L^*_E	-0,31	-1,19	-0,57	-1,50	-0,21	-0,77	1,07	0,83	1,49	-1,55	-6,35
L^*_B	1342 ,621	1245 ,201	1579,5 ,439	13953 ,365	616 ,929	1288,5 ,810	7846,5 ,953	6719,5 ,624	1139 ,574	2097,5 ,286	8865,5*** ,001
u^*_E	2,44	-2,98	85,09	-3,18	20,37	-17,04	14,63	14,88	78,87	20,03	-1,26
u^*_A	1,87	0,22	57,36	22,62	21,24	-13,29	28,30	10,63	56,34	3,50	5,61
u^*_B	1,87	-1,08	84,66	-0,23	21,62	-16,42	22,23	14,19	78,62	10,18	2,62
u^*_E	0,57	-3,19	27,73	-25,80	-0,87	-3,75	-13,67	4,25	22,53	16,54	-6,87
u^*_A	1398 ,887	1265 ,119	1886*** ,000	21516,5*** ,000	689 ,737	1312,5 ,371	8000*** ,001	7046 ,071	1298** ,003	2094,5** ,002	10756*** ,000
u^*_E	0,57	-1,89	0,43	-2,96	-1,25	-0,63	-7,60	0,69	0,25	9,85	-3,88
u^*_B	1398 ,887	1265 ,249	1699,5 ,902	14065 ,433	575 ,571	1303,5 ,888	6387,5** ,010	6813,5 ,755	1199 ,889	1948,5 ,087	10000,5 ,054
v^*_E	-0,45	0,13	14,39	12,35	45,72	-35,28	14,25	-6,68	34,02	-12,24	-2,86
v^*_A	-0,49	-1,10	16,99	7,97	38,97	-35,69	13,59	-1,92	39,86	-10,74	-3,58
v^*_B	-0,49	-0,88	14,27	9,81	42,04	-36,43	13,95	-2,61	34,53	-13,23	-2,64
v^*_E	0,04	1,23	-2,60	4,38	6,75	0,40	0,67	-4,76	-5,85	-1,50	0,72
v^*_A	1377,5 ,785	1389 ,416	2506 ,054	33912,5* ,039	628 ,330	1445,5 ,942	9985 ,589	6469** ,005	1370** ,009	2621,5 ,259	12970,5 ,324
v^*_E	0,04	1,01	0,12	2,54	3,68	1,14	0,31	-4,08	-0,52	0,98	-0,22
v^*_B	1377,5 ,785	1359 ,572	1649,5 ,693	13597 ,197	601 ,792	1291,5 ,826	7416,5 ,421	5807,5* ,027	1156 ,658	2316,5 ,900	11429 ,957

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

Sin embargo, ahora haremos uso del mismo (concretamente de R^2), aprovechando las ventajas de que el rango de valores de este estadístico está acotado, y su valor es fácilmente interpretable, con el único objetivo, estrictamente comparativo, de confrontar entre sí el grado de ajuste de las predicciones de los Modelos A y B.

De esta forma, a partir del análisis de la correlación lineal entre predicciones y datos empíricos, podemos establecer la proporción de varianza explicada por cada uno de los dos modelos, así como el incremento en R^2 (ΔR^2) que aporta el Modelo B sobre el Modelo A.

La última fila de la Tabla 6.31 muestra el valor de R^2 existente entre las matrices empíricas (Tablas AI.1.1 y AI.1.2) y las predichas por los Modelos A (Tablas 6.26.1 y 6.26.2) y B (Tablas 6.29.1 y 6.29.2), tanto para protanopes como para deuteranopes. Puede observarse que, a nivel global, el Modelo B ofrece un $\Delta R^2 = 0,08$ para protanopes y un $\Delta R^2 = 0,09$ para deuteranopes.

Analizando las categorías por separado, se observa que el valor de ΔR^2 es mucho mayor para algunas categorías que para otras, tal y como se muestra en la Tabla 6.33. Nuevamente, puede observarse que para algunas categorías como *rojo* y *verde*, el Modelo B logra el mayor incremento en proporción de varianza explicada (con respecto al Modelo A), mientras que para otras, como *amarillo* y *blanco*, el incremento, o bien no existe o, de existir, es mínimo.

Tabla 6.33. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la distribución empírica del porcentaje de aciertos y errores de cada CCB, y las distribuciones derivada de las predicciones de los Modelos A y B. Las categorías se han dispuesto en orden descendente, para cada grupo de dicrómatas, según la magnitud del incremento en R^2 conseguido al emplear el Modelo B en lugar del Modelo A.

Protanopes				Deuteranopes			
CCB	ΔR^2	R^2		CCB	ΔR^2	R^2	
		Modelo A	Modelo B			Modelo A	Modelo B
V	,40	,56	,96	V	,49	,47	,95
R	,40	,59	,99	R	,31	,68	,99
Az	,23	,73	,95	Nar	,14	,86	1,00
Ros	,12	,86	,97	Mor	,12	,81	,93
Nar	,07	,73	,80	Ros	,05	,87	,92
Mar	,06	,89	,96	N	,04	,95	,99
N	,04	,95	,99	Gri	,03	,81	,84
Gri	,01	,83	,84	Mar	,03	,93	,96
B	,00	,99	,99	Am	,02	,97	,99
Am	,00	,99	,99	Az	,02	,98	1,00
Mor	-,06	,99	,94	B	,00	1,00	1,00
Promedio	,115	,83	,94	Promedio	,114	,85	,96

Nótese el impresionante aumento en el porcentaje de varianza explicada para *rojo*, que pasa de un 59% a un 99% en protanopes, y de un 68% a un 99% en deuteranopes. Con *verde* ocurre algo muy parecido: en protanopes se pasa de un 56% a un 96%, y, en deuteranopes, de un 47% a un 95%. Tal y como se derivó del análisis comparativo entre los centroides, parece evidente que las predicciones del Modelo B se ajustan mejor a los datos que las del Modelo A (la única categoría para la que se pierde poder predictivo es para *morado* en protanopes).

Por último, se empleó esta misma estrategia para comprobar hasta qué punto, a nivel individual, las predicciones del Modelo B se ajustan mejor a los datos que las predicciones del Modelo A. Para ello, se estableció el coeficiente de correlación de Pearson entre las matrices de confusión individuales y las matrices de confusión derivadas de las predicciones de ambos modelos.

La Tabla 6.34 muestra los resultados obtenidos. Nótese que, mientras que para la mayoría de los observadores, el Modelo B supuso un gran incremento en la proporción de varianza explicada (ΔR^2), existió una minoría en la que el Modelo B apenas supuso una diferencia con respecto al ajuste conseguido por las predicciones del Modelo A (concretamente, para dos observadores protanopes, P1: LEL y P7: JJMC, y para un observador deuteranope, D7: JP). Como se comentará en la discusión, es muy probable que estos observadores se comporten como auténticos dicrómatas (*true dichromats*) incluso con estímulos cuyo tamaño excede los 2°.

Tabla 6.34. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la matriz de confusión empírica de cada observador, y las matrices de confusión derivadas de las predicciones de los Modelos A y B. Los observadores se han dispuesto en orden descendente, dentro de cada grupo de dicrómatas, según la magnitud del incremento en R^2 conseguido al emplear el Modelo B en lugar del Modelo A.

Protanopes				Deuteranopes			
Observador	ΔR^2	R^2		Observador	ΔR^2	R^2	
		Modelo A	Modelo B			Modelo A	Modelo B
P2: JPGA	,19	,73	,92	D5: EGS	,13	,75	,87
P6: JMI	,16	,76	,92	D1: CTM	,10	,71	,81
P3: PAL	,13	,65	,78	D2: ASC	,10	,85	,96
P4: RN	,13	,75	,87	D4: AEM	,10	,81	,91
P8: JGL	,08	,81	,89	D9: DSC	,10	,65	,74
P5: DLL	,08	,75	,83	D8: JT	,08	,83	,91
P1: LEL	,00	,86	,86	D6: FJR	,08	,86	,93
P7: JJMC	-,01	,55	,55	D3: JSC	,06	,82	,88
				D7: JP	,02	,85	,88

RESULTADOS: TAREA DE BÚSQUEDA DE MEJORES EJEMPLARES

De forma análoga a como hacen las Tablas 6.13.1 y 6.13.2 para la tarea de mapa de colores, las Tablas 6.35.1 (protanopes) y 6.35.2 (deuteranopes), muestran el porcentaje de aciertos, y la distribución del porcentaje de errores cometidos, para cada TCB, en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. Para facilitar la comparación entre ambas tareas, se tomó como criterio para definir un acierto el que anteriormente definimos como criterio estricto (o criterio moda). Es decir, se consideró que la selección de un estímulo como el mejor ejemplar de una categoría era un acierto si dicha categoría era la moda de la distribución de respuestas (de CCB) de los TN ante el estímulo considerado.

Lo primero que llama la atención es que el **porcentaje de aciertos** (diagonal de las matrices) es **mayor para la tarea de prototipos** que para la tarea de mapa de colores, como era de esperar (con la única y notable excepción de *morado* en ambos grupos de observadores, y *marrón* en protanopes). El resultado de la prueba de Wilcoxon para medidas repetidas, mostró que las diferencias fueron estadísticamente significativas tanto para protanopes (medianas: 86,36 vs. 55,91; $Z = -2,52$; $p < 0,01$) como para deuteranopes (90,91 vs. 55,41; $Z = -2,67$; $p < 0,005$), así como para los datos agregados de ambos grupos (90,91 vs. 55,41; $Z = -3,62$; $p < 0,001$).

Tal y como ocurrió con la tarea de mapa de colores, **no existieron diferencias estadísticamente significativas** entre protanopes y deuteranopes en el **porcentaje de aciertos** en la búsqueda de foci a nivel global (medianas: 86,36 vs 90,91; $U = 29,5$; $p = 0,251$). Para comparar la ejecución **categoría por categoría** (consúltese la Figura 6.19), se empleó la prueba de chi-cuadrado (puesto que el tamaño de la muestra es muy pequeño, y en algunas de las tablas de contingencia resultantes, hay frecuencias observadas iguales a 0, y/o más del 20% de las frecuencias esperadas son menores que 5, se efectuaron pruebas de significación exacta), hallándose diferencias estadísticamente significativas para *marrón* [$\chi^2_{(2, N = 32)} = 9,93$, $p < 0,05$], *rosa* [$\chi^2_{(2, N = 32)} = 7,57$, $p < 0,05$], *morado* [$\chi^2_{(2, N = 32)} = 9,7$, $p < 0,01$] y *gris* [$\chi^2_{(2, N = 32)} = 6,73$, $p < 0,05$].

Tabla 6.35.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		100										0,00
R			87,50				12,50					0,00
V				100								0,00
Am					100							0,00
Az						100						0,00
Mar							62,50					0,00
Ros				37,50				75,00		13,46		0,96
Nar				10,58					87,50			1,04
Mor					11,46					37,50		1,89
Gri				34,91		56,82		3,79			62,50	2,59

Tabla 6.35.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores deuteranopes en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	88,89							11,11				0,00
N		100										0,00
R			77,78				13,33		8,89			0,00
V				100								0,00
Am					100							0,00
Az						100						0,00
Mar							100					0,00
Ros			18,52					55,56	9,26		14,81	1,85
Nar									100			0,00
Mor			7,05			45,86				44,44		2,65
Gri										11,11	88,89	0,00

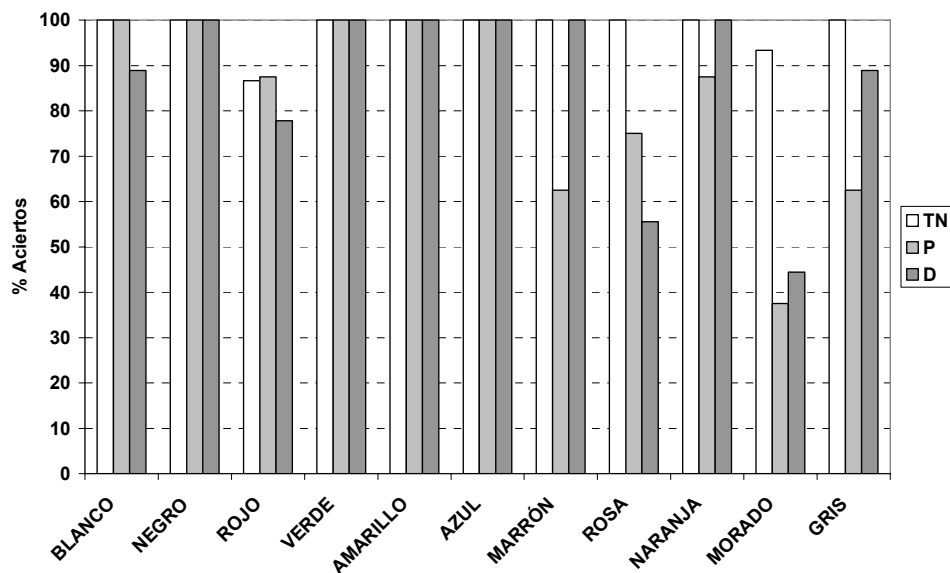


Figura 6.19. Porcentaje de aciertos en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB. Barras de color blanco: tricrómatas normales. Barras de color gris claro: protanopes. Barras de color gris oscuro: deuteranopes (los datos para protanopes y deuteranopes se muestran en las diagonales de las Tablas 6.35.1 y 6.35.2).

La prueba exacta de Fisher mostró que, **en comparación con los TN**, los **protanopes** cometieron significativamente **más errores** al buscar los mejores ejemplares de **marrón**, ($p < 0,05$) **morado** ($p < 0,01$) y **gris** ($p < 0,05$), y los **deuteranopes**, al buscar los de **rosa** y **morado** ($p < 0,05$). Entre protanopes y deuteranopes no existieron diferencias significativas (únicamente para **marrón** se obtuvo un valor $p = 0,082$, cercano a 0,05).

Por otra parte, obsérvese el **gran parecido entre la naturaleza de los errores cometidos en la tarea de mapa de colores** (Tablas 6.13.1 y 6.13.2) **y la tarea de búsqueda de foci** (Tablas 6.35.1 y 6.35.2): todos los tipos de error registrados en la segunda tarea se registraron también en la primera. En la mayor parte de las ocasiones, los errores cometidos al buscar los mejores ejemplares, coincidieron con el error más frecuente de la tarea de mapa de colores: *rojo-marrón*, *marrón-verde*, *rosa-morado*, *naranja-amarillo*, *morado-azul*, *gris-verde* (en protanopes), *blanco-rosa*, y *rojo-naranja* (en deuteranopes), o en su defecto con el segundo error más frecuente: *rojo-marrón*, *rosa-gris*, *morado-azul*, y *gris-morado* (en deuteranopes). Sin duda, la disociación más clara se da para *rosa* en deuteranopes: los errores *rosa-rojo* y *rosa-naranja* registrados al buscar los mejores ejemplares, apenas si existieron en la tarea de mapa de colores.

Las Figuras 6.20 y 6.21 muestran, en diferentes diagramas de cromaticidad $CIE_{u'v'}$ 1976, los estímulos seleccionados por protanopes y deuteranopes, respectivamente, en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. Los cuadrados con fondo blanco representan aciertos, mientras que los errores se representan mediante cuadrados sólidos (el tamaño codifica la frecuencia de selección). Para hacer las figuras más claras, se ha optado por no representar los datos de la tarea de mapa de colores, presentes en las Figuras 6.12 y 6.13. Sin embargo, se han mantenido las líneas de confusión representadas en dichas figuras (aquellas con una pendiente igual a la mediana de la distribución de este parámetro para los aciertos, líneas continuas, y para los errores, líneas discontinuas, obtenidos en la tarea de mapa de colores). Como puede observarse, en la mayor parte de las ocasiones en las que se produjeron errores, las coordenadas cromáticas de los mismos estuvieron localizadas muy cerca de las líneas de confusión representadas.

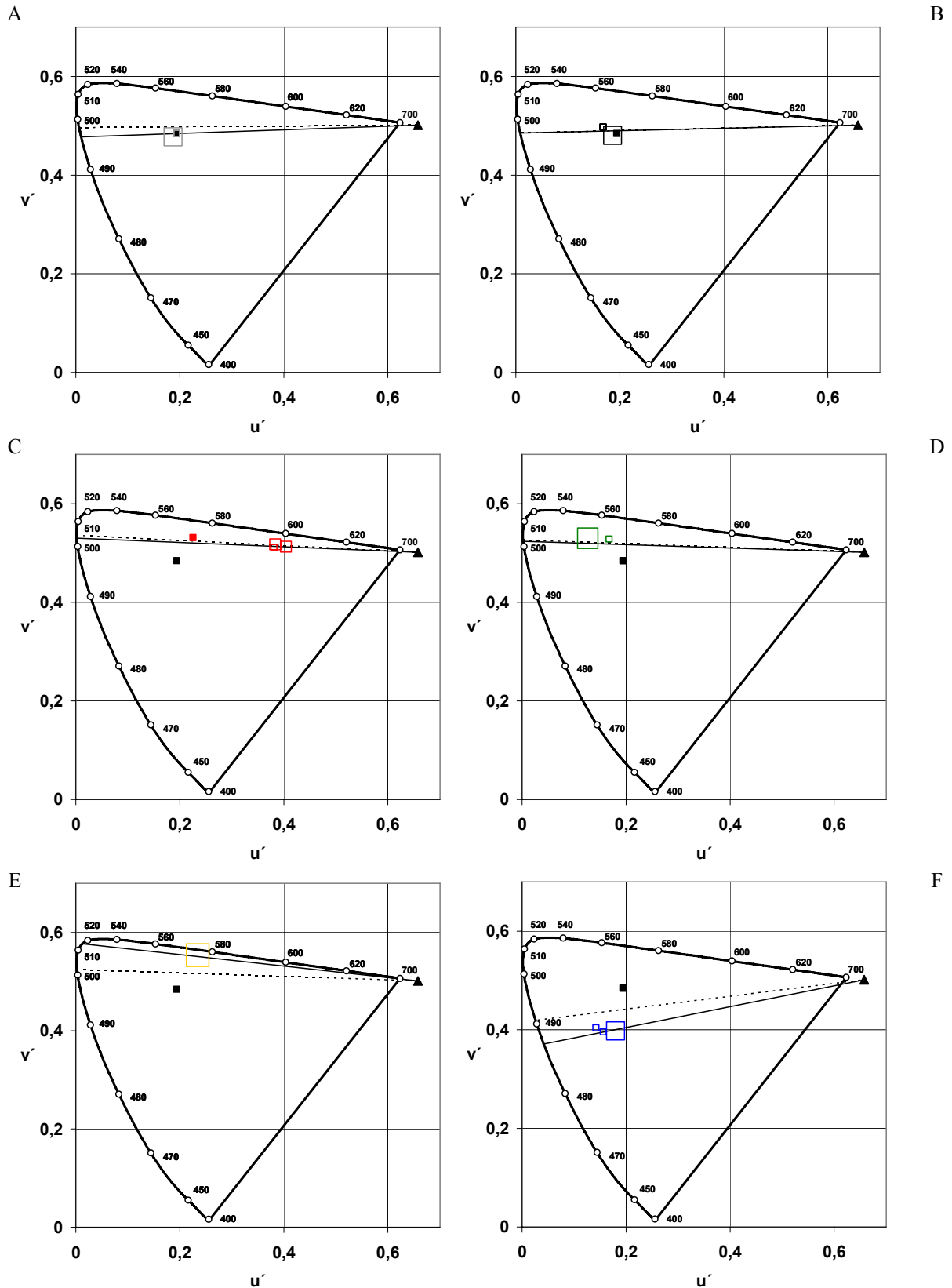


Figura 6.20. Estímulos seleccionados por protanopes en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Se muestran los estímulos seleccionados correctamente (cuadrados con fondo blanco) y los errores (cuadrados sólidos). El tamaño codifica la frecuencia de selección. Las líneas que parten del punto de confusión tienen una pendiente igual a la mediana de la distribución de este parámetro para los aciertos (línea continua) y los errores (línea discontinua) obtenidos en la tarea de mapa de colores. El resto de símbolos conserva el mismo significado que en la Figura 6.12. Continúa.

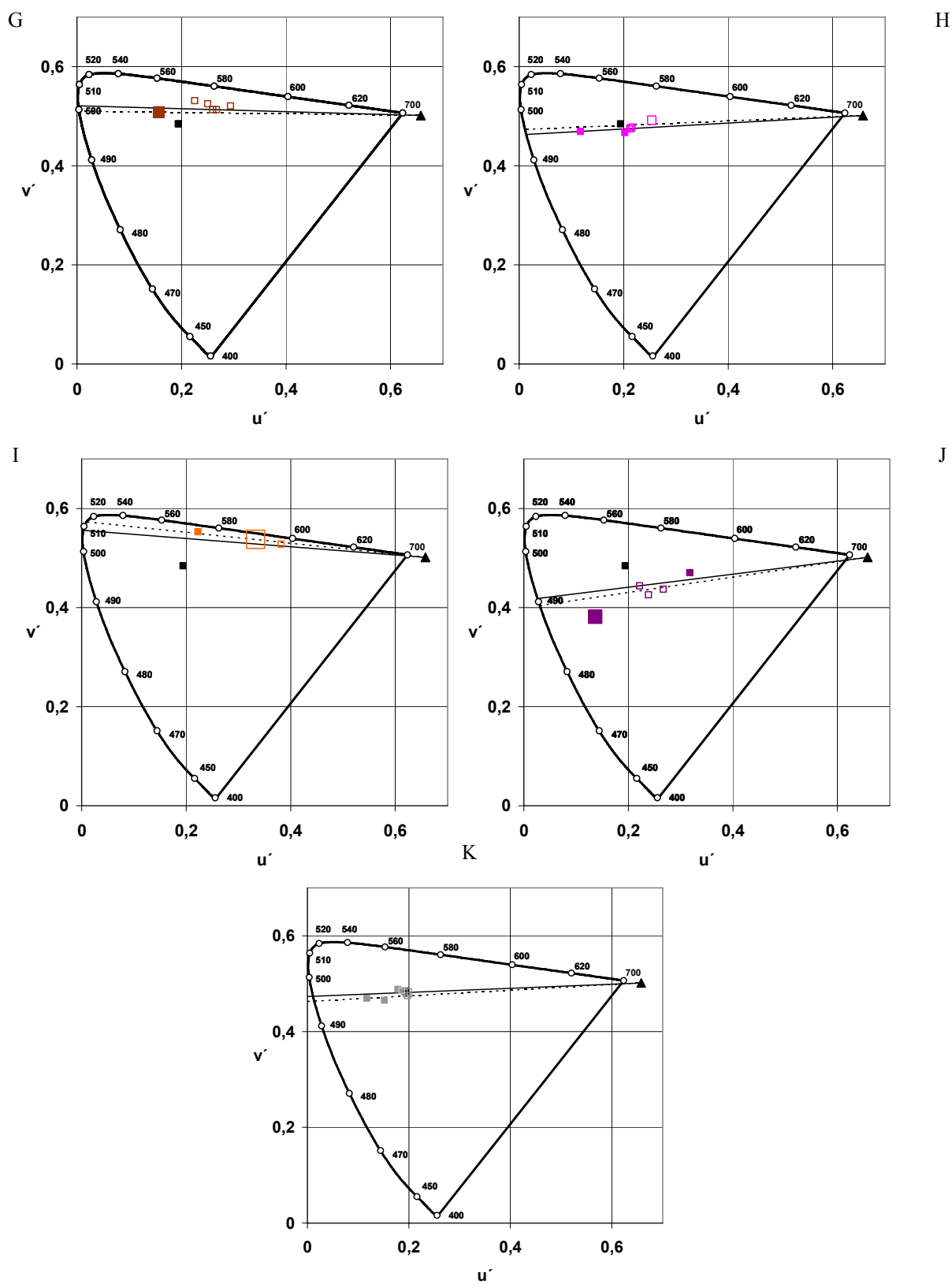


Figura 6.20. (Continuación).

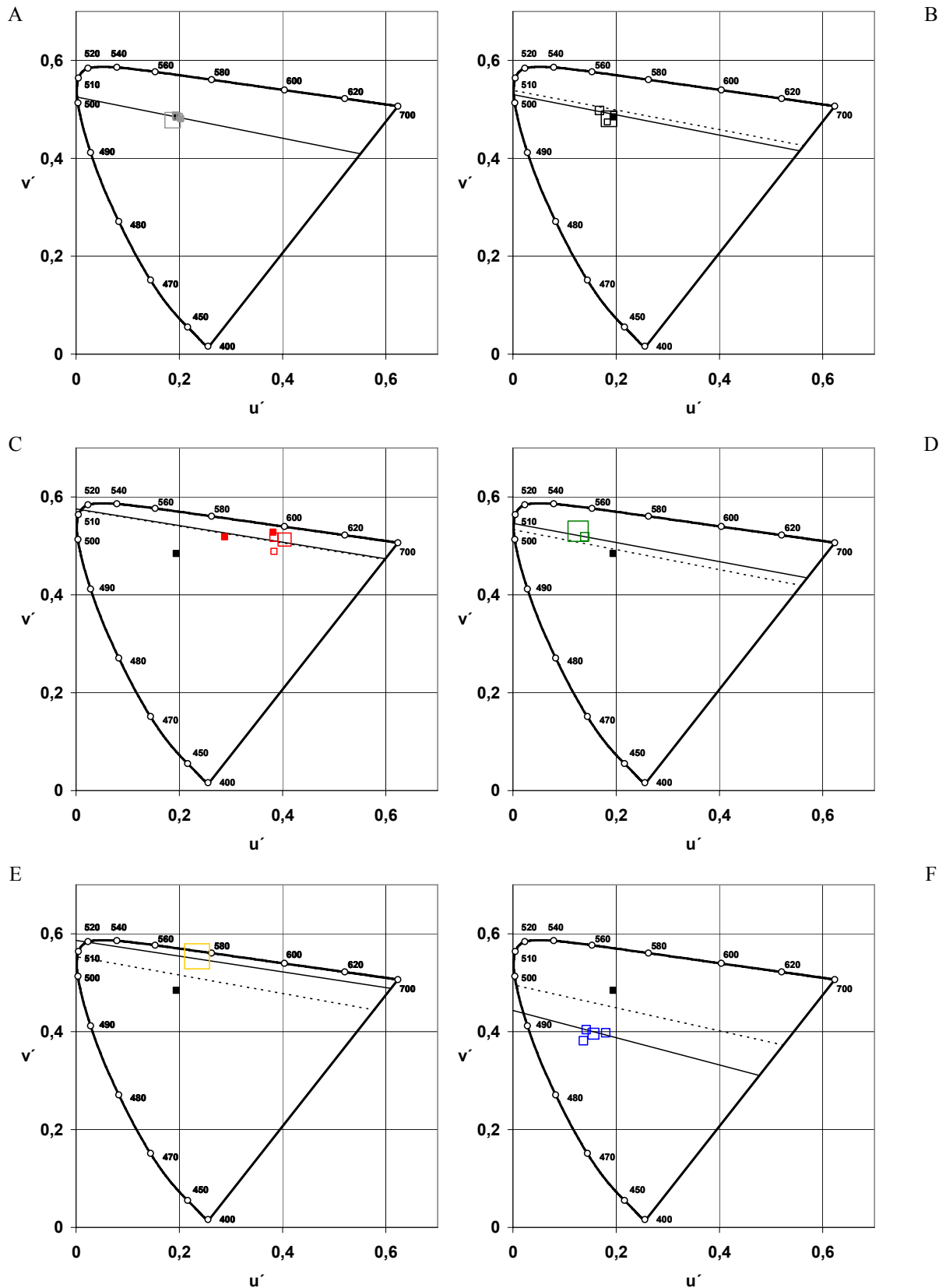
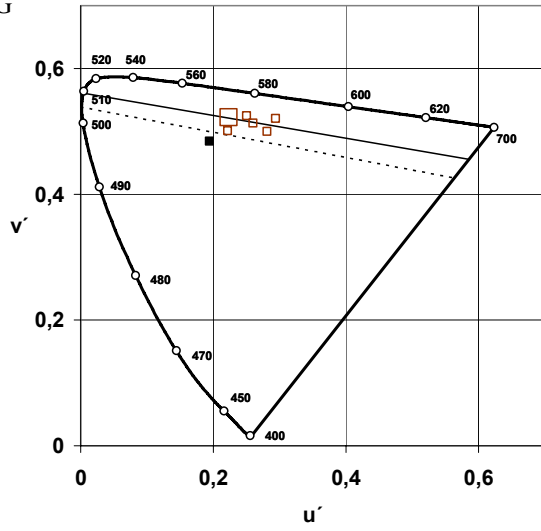


Figura 6.21. Estímulos seleccionados por deuteranopes en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Se muestran los estímulos seleccionados correctamente (cuadrados con fondo blanco) y los errores (cuadrados sólidos). Los símbolos conservan el mismo significado que en la Figura 6.20 (el punto de confusión deuteranope cae fuera de la representación). La Figura 6.21 continúa en la página siguiente.

G



Con el objeto de concretar esta afirmación, y para incluir además la información relativa a la claridad de los estímulos, no representada en los diagramas de cromaticidad, se han confeccionado las Tablas 6.36.1 (protanopes) y 6.36.2 (deuteranopes). En ellas se especifican las muestras seleccionadas erróneamente en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares para las distintas categorías (primera columna), especificando su denominación NCS (segunda columna) así como sus coordenadas cromáticas y su claridad estándar (columnas 3-5). Seguidamente, se muestran las respuestas dadas por los dicrómatas y los tricrómatas normales ante dicha muestra en la tarea de mapa de colores (columnas 6 y 7).

A continuación, se muestra la compatibilidad de la muestra seleccionada erróneamente (columna 2) como mejor ejemplar de la categoría indicada en la primera columna de la tabla, con dicha categoría, calculada a partir de las predicciones del Modelo A (columna 8), y del Modelo B (columna 9). La última columna especifica quién fue el observador que cometió el error, así como el incremento en el porcentaje de varianza explicada que para dicho observador supuso la aplicación del Modelo B sobre el Modelo A, a la hora de explicar los datos obtenidos en la tarea de mapa de colores (Tabla 6.34).

A modo de ejemplo, y para facilitar la lectura e interpretación de las Tablas 6.36.1-6.36.2, se comentará uno de los errores que en ellas aparecen. Como puede verse en la Tabla 6.36.1, la muestra S 6030-Y fue seleccionada **erróneamente** por un protanope como mejor ejemplar de la categoría *rojo*. La compatibilidad de esta muestra con *rojo* para protanopes, computada a partir del Modelo A, es del 87,50%, y del 12,50% según el Modelo B, que incluye discriminación residual *rojo-verde*. Ahora bien, el observador que de hecho cometió el error fue JJMC (P7), observador para el cual el Modelo B no supuso ningún incremento en la proporción de varianza explicada de los datos de la tarea de mapa de colores con respecto a las predicciones del Modelo A (ya le hemos calificado anteriormente como posible “*true dichromat*”). Por esta razón aparece sombreada en gris la casilla correspondiente a la compatibilidad computada a partir del Modelo A, resaltando que para el observador que cometió el error, las predicciones derivadas de este modelo ofrecen, presumiblemente, una mejor estimación que las predicciones derivadas a partir del Modelo B.

Tabla 6.36.1. Errores cometidos en la tarea de búsqueda de foci por el grupo de observadores protanopes. Las cinco primeras columnas indican la categoría cuyo mejor ejemplar era objeto de la búsqueda, la denominación NCS de la muestra seleccionada erróneamente, y sus características colorimétricas estándar. A continuación, se muestra la respuesta de los observadores protanopes y tricrómatas normales ante dicha muestra en la tarea de mapa de colores. Las siguientes dos columnas muestran el porcentaje de compatibilidad, según los Modelos A y B, de la muestra seleccionada erróneamente (segunda columna) con la categoría indicada en la primera columna. Por último, se muestra el observador que cometió el error, y entre paréntesis, el incremento en R^2 (ΔR^2) que para dicho observador supone aplicar el Modelo B frente al Modelo A en la tarea de mapa de colores (Tabla 6.34). Las casillas resaltadas en gris indican que, para el observador que cometió el error, el Modelo B supuso un incremento mínimo (“*true dichromats*”: la casilla de la columna Modelo A es la que se resalta), o máximo (gran discriminación residual *rojo-verde*: la casilla de la columna Modelo B es la que se resalta).

CCB	Denom. NCS	L*	u'	v'	P	TN	Modelo A	Modelo B	Observador (ΔR^2)
Rojo	S 6030-Y	33,34	0,225	0,531	Mar (7) V (3) R (2) #	Mar (12)	87,50	12,50	P7: JJMC (-0,01)
Marrón	S 7020-G10Y	26,14	0,157	0,508	Mar (6) # V (3) # R (1) #	V (15)	71,43	28,57	P1: LEL (0,00)
					Mar (6) # V (3) R (1)		71,43	28,57	P7: JJMC (-0,01)
					Mar (6) # V (3) R (1)		71,43	28,57	P8: JGL (0,08)
Rosa	S 3020-R50B	56,23	0,202	0,467	Ros (5) Az (1)	Mor (14)	87,50	50	P6: JMI (0,16)
	S 2060-B50G	51,28	0,117	0,470	Gri (7) V(1) Az(1) Ros (1) #	V (11) Az (1)	75,00	12,5	P1: LEL (0,00)
Naranja	S 1075-G90Y	68,44	0,222	0,553	Nar (6) Am (4) V (1)	Am (11) V(1)	25,00*	12,5*	P2: JPGA (0,19)
Morado	S 4550-R90B	25,62	0,137	0,381	Az (8) # Mor (6) #	Az (15)	100**	33,33**	P3: PAL (0,13)
					Az (8) # Mor (6) #		100**	33,33**	P4: RN (0,13)
					Az (8) # Mor (6)		100**	33,33**	P5: DLL (0,08)
					Az (8) # Mor (6) #		100**	33,33**	P7: JJMC (-0,01)
Gris	S 2060-B50G	51,28	0,117	0,470	Gri (7) # V(1) Az(1) Ros (1)	V (11) Az (1)	100	42,86	P6: JMI (0,16)
	S 4030-B30G	47,64	0,152	0,466	Gri (7) # V(1) Az(1) Ros (1)	V (8) Az (1)	100	57,14	P3: PAL (0,13)

#: indica que el observador, además de seleccionar la muestra correspondiente como el mejor ejemplar de la categoría, también la seleccionó en la tarea de mapa de colores.

*: para este estímulo, la pendiente de la línea de confusión protán ($a_p = -0,1191$) cae fuera del rango de pendientes de la categoría *naranja* (-0,1119, 0,0017). De forma equivalente, su saturación protán ($s_p = 1,05$) cae fuera del rango correspondiente (0,36; 1,01). La compatibilidad de los Modelos A y B se computó extrapolando a partir del polinomio correspondiente.

**: para este estímulo, la pendiente de la línea de confusión protán ($a_p = 0,2302$) cae fuera del rango de pendientes de la categoría *morado* (0,0132, 0,2171). De forma equivalente, su saturación protán ($s_p = 1,13$) cae fuera del rango correspondiente (0,29, 1,04). La compatibilidad de los Modelos A y B se computó extrapolando a partir del polinomio correspondiente.

Tabla 6.36.2. Errores cometidos en la tarea de búsqueda de foci por el grupo de observadores deuteranopes. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.36.1 pero para deuteranopes.

CCB	Denom. NCS	L^*	u'	v'	D	TN	Modelo A	Modelo B	Observador (ΔR^2)
Rojo	S 3050-Y60R	44,97	0,288	0,519	V (2) Mar (2) R (1)	Mar (15)	88,89	33,33	D8: JT (0,08)
Rosa	S 4010-R50B	52,34	0,198	0,474	Gri (5) Ros (2) V (1)	Gri (2)	75,00	62,50	D9: DSC (0,10)
	S 2005-R30B	68,06	0,197	0,481	Gri (8) # Ros (7) # V (1)	Gri (6)	50,00	50,00	D8: JT (0,08)
Morado	S 7020-R90B	21,98	0,160	0,441	Az (3) # Mor (2) V (1) Mar (1) N (1)	Az (11)	80,00*	40,00*	D3: JSC (0,06)
					Az (3) Mor (2) V (1) Mar (1) N (1)		80,00*	40,00*	D4: AEM (0,10)
	S 4550-R90B	25,62	0,137	0,381	Az (7) Mor (2) # V (1)	Az (15)	60,00**	40,00**	D5: EGS (0,13)
					Az (7) Mor (2) # V (1)		60,00**	40,00**	D9: DSC (0,10)
Gris	S 3020-R50B	56,23	0,202	0,467	Ros (5) Gri (4) # Mor (3)	Mor (14)	75,00	62,50	D2: ASC (0,10)

#: indica que el observador, además de seleccionar la muestra correspondiente como el mejor ejemplar de la categoría, también la seleccionó en la tarea de mapa de colores.

: para este estímulo, la claridad deuteranope ($L_d^ = 21,08$) cae fuera del rango de pendientes de la categoría *morado* (21,41, 63,71). La compatibilidad de los Modelos A y B se computó extrapolando a partir del polinomio correspondiente.

**: para este estímulo, la pendiente de la línea de confusión deután ($a_d = -0,2964$) cae fuera del rango de pendientes de la categoría *morado* (-0,2757, -0,1817). De forma equivalente, su saturación deután ($s_d = 1,43$) cae fuera del rango correspondiente (-0,63, 1,06). La compatibilidad de los Modelos A y B se computó extrapolando a partir del polinomio correspondiente.

Como puede observarse, en general, **los errores cometidos mostraron un alto grado de compatibilidad con la categoría para la que fueron seleccionados como mejores ejemplares**. Las medianas de las distribuciones (asimétricas negativas) del porcentaje de compatibilidad de los errores, computado a partir de las predicciones del Modelo A, fueron 83,6% (datos agregados), 90% (protanopes), y 76,6% (deuteranopes). Evidentemente, las predicciones del Modelo B reducen mucho el porcentaje de compatibilidad: 35,17% (datos agregados y protanopes), y 45,96% (deuteranopes).

La mayor discrepancia se da para *naranja* en protanopes: se seleccionó un estímulo como mejor ejemplar de esta categoría, a pesar de que el porcentaje de compatibilidad atribuido por los Modelos A y B es muy bajo (25% y 12,5%, respectivamente). Nuevamente, se trata de un error del tipo *naranja-amarillo*, que como ya se comentó anteriormente, es infraestimado por ambos modelos.

Evidentemente, como ya se ha indicado, la aplicabilidad de un modelo u otro depende del observador concreto que cometiera el error, tal y como se resalta en la tabla mediante color gris. En aquellas filas en las que no está resaltada ninguna de las casillas correspondientes al porcentaje de compatibilidad según el Modelo A o el Modelo B, es decir, para aquellos errores cometidos por observadores que no mostraron un valor R^2 extremo (ni mínimo ni máximo dentro de su grupo de observadores), debe entenderse que la compatibilidad sería un valor intermedio entre los dos que se presentan.

Por último, cabría preguntarse si existe algún tipo de **relación entre la ejecución mostrada en las tareas de mapa de colores y de búsqueda de mejores ejemplares**. La Figura 6.22 representa el porcentaje de acierto obtenido en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares en función del obtenido en la tarea de mapa de colores (datos agregados de protanopes y deuteranopes). La línea continua representa la recta que mejor se ajusta a los datos. La relación lineal entre ambas variables **no resultó estadísticamente significativa**, ni para los datos agregados ($R^2 = 0,004$, $F_{(1,15)} = 0,06$, $p = 0,808$), ni para protanopes ($R^2 = 0,206$, $F_{(1,6)} = 1,55$, $p = 0,259$) ni deuteranopes ($R^2 = 0,142$, $F_{(1,7)} = 1,16$, $p = 0,318$) por separado. Resulta evidente la falta de relación entre el rendimiento obtenido en ambas tareas: el grado de acierto al buscar mejores ejemplares es muy superior al mostrado en la tarea de mapa de colores (recuérdense los resultados de la prueba de Wilcoxon), y además no parece depender de este.

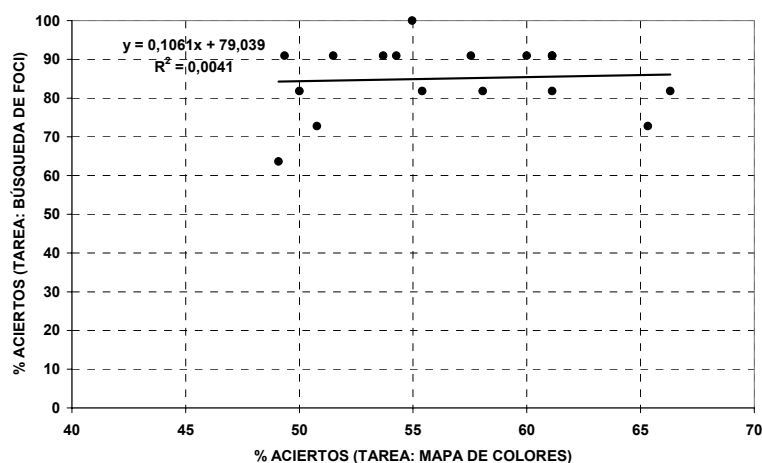


Figura 6.22. Relación entre el rendimiento obtenido por daltónicos dicrómatas en las dos tareas realizadas. Se representa el porcentaje de aciertos obtenido en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares en función del obtenido en la tarea de mapa de colores (nótese que mientras que la escala del eje de ordenadas va de 0 a 100, la del eje de abscisas va de 40 a 70 para facilitar la visibilidad de los distintos puntos de la figura). La línea continua representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados (también se muestra la ecuación y el valor de R^2 correspondientes).

Las respuestas dadas para la categoría *verde* suponen tal vez el mejor exponente de esta afirmación: mientras que todos los observadores, tanto protanopes como deuteranopes, acertaron a la hora de buscar el mejor ejemplar de verde (Figura 6.19), la variabilidad en el porcentaje de acierto asociado a esta categoría en la tarea de mapa de colores es abrumadora (el rango va desde 28,57% hasta 75% en protanopes, y desde 27,27% hasta 57,14% en deuteranopes).

La interpretación más sencilla de este resultado, es que la tarea de búsqueda de mejores ejemplares resulta ser poco sensible a una clase de diferencias individuales cuyo efecto sí que puede ser fácilmente detectable a partir de la realización de la tarea de mapa de colores. En otras palabras, la tarea de búsqueda de mejores ejemplares no es válida para discriminar entre diferentes grados de discriminación residual *rojo-verde*, razón por la cual no es un buen predictor de cómo se manejan los daltónicos dicrómatas en una tarea que implique el uso de colores no prototípicos.

A continuación se informa de un dato que apoya esta interpretación: la relación lineal entre el incremento en R^2 (ΔR^2) que aporta el Modelo B sobre el Modelo A en la tarea de mapa de colores (Tabla 6.34), y el porcentaje de aciertos en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, no resultó estadísticamente significativa, ni para los datos agregados ($R^2 = 0,143$, $F_{(1,15)} = 2,50$, $p = 0,134$), ni para protanopes ($R^2 = 0,481$, $F_{(1,6)} = 5,56$, $p = 0,056$) ni deuteranopes ($R^2 = 0,083$, $F_{(1,7)} = 0,64$, $p = 0,451$) por separado. Únicamente en el caso de los protanopes por separado, el nivel crítico se acerca al valor $p = 0,05$. Ello se debe a que dos del total de los ocho observadores protanopes, P1: LEL y P7: JJMC, tuvieron un valor $\Delta R^2 \approx 0$ (Tabla 6.34), y sus porcentajes de acierto al buscar los mejores ejemplares fueron los más bajos (63,63% y 72, 72%, respectivamente). Como se recordará, estos observadores fueron anteriormente clasificados como verdaderos dicrómatas.

Parece pues que, en general, la especificad estimular de los mejores ejemplares de las CCBs, disminuye la probabilidad de cometer errores, incluso a pesar de que la discriminación residual *rojo-verde* de los observadores que realizan la tarea no sea muy elevada. En la discusión volveremos a tratar este importante punto con más detalle.

DISCUSIÓN: TAREA DE MAPA DE COLORES

A diferencia de otros trabajos que se han ocupado del estudio de las CCB en observadores dicrómatas (consúltese el apartado 1.4.2.1), en la presente tesis se han seguido diferentes aproximaciones para abordar el problema objeto de estudio. Dichas aproximaciones van desde el uso de una técnica de análisis multivariante como el MDS, para estudiar la conexión entre categorías, hasta el análisis colorimétrico de los errores cometidos, pasando por el análisis de otras variables relevantes, como son la frecuencia de selección y su posible influencia en los resultados obtenidos. De esta manera, se da una visión global e integrada sobre el uso de TCB por parte de protanopes y deuteranopes, en comparación con el de los TN.

El estudio comparativo de los mapas de color, permitió establecer la existencia de **conexiones entre categorías** que no se dieron en tricrómatas normales, pero sí en protanopes (Tabla 6.5.1) y deuteranopes (Tabla 6.5.2), replicando por una parte resultados de investigaciones previas, y revelando además la existencia de otras conexiones.

Así, se registraron conexiones entre *verde-marrón*, *verde-naranja*, y *azul-rosa*, tanto en protanopes como en deuteranopes, como habían puesto de manifiesto trabajos anteriores (Montag y Boynton, 1994). Otras conexiones comunes en ambos tipos de dicrómata, detectadas en esta investigación, fueron: *rosa-gris* (7 P y 8 D), *amarillo-naranja* (5 P y 2 D), *rojo-marrón* (3 P y 5 D), *verde-rosa* (3 D, únicamente a nivel grupal en P), y *rojo-verde* (1 P y 1 D). Por último, también se dieron conexiones sólo existentes en protanopes, como *negro-rojo* (2 P), y otras sólo existentes en deuteranopes, como *verde-morado* (2 D).

Estos resultados refuerzan la importancia de haber incluido un grupo control (formado por TN) en la presente investigación, puesto que las conexiones *verde-marrón*, *rojo-marrón*, *amarillo-naranja*, y *rosa-gris*, que no aparecieron bajo las condiciones empleadas en este estudio, sí que han sido detectadas previamente en TN, en experimentos de denominación de color con una muestra estimular más amplia (consúltese por ejemplo Lillo et al., 2007, Tabla 3).

Los análisis de escalamiento multidimensional (MDS) aplicados a los datos sobre conexiones entre categorías, facilitan la interpretación de los mismos en términos de cuáles son las dimensiones subyacentes (dentro de cada grupo de observadores) que permiten organizar las categorías en los espacios de color reconstruidos.

En este trabajo se ha seguido una orientación diferente a la que habitualmente sirve de guía en la literatura especializada para crear las matrices de similitud que sirven de entrada en el MDS. Para ser más concretos: mientras que habitualmente se trabaja calculando algún índice de similitud entre pares de estímulos (consúltese, por ejemplo, Bimler y Paramei, 2004, 2005), en esta investigación hemos preferido abordar los datos desde una aproximación diferente, a saber, calculando la similitud entre categorías, y no entre estímulos. La consecuencia obvia es que en las matrices de similitud empleadas en los diferentes MDS los objetos no son estímulos, sino las propias CCB, lo que reduce considerablemente el número de objetos (una de cuyas posibles consecuencias puede ser el ajuste tan satisfactorio de las soluciones bidimensionales de los MDS, consúltese la Tabla 6.6).

La razón por la cual se ha optado por tomar esta decisión es evidente: el objetivo que se perseguía al realizar este tipo de análisis era el de reproducir las distancias relativas que se dan a nivel subjetivo entre categorías, y no tanto entre los estímulos que han servido de base para realizar una localización colorimétrica de las mismas (el uso de los estímulos como unidad de análisis queda suficientemente satisfecho en el resto de análisis efectuados). A raíz de los resultados encontrados, parece que la orientación seguida ha sido de una gran utilidad para cubrir el objetivo expuesto, máxime cuando tales resultados han sido independientes de la aproximación concreta que se haya seguido para cuantificar la fuerza de las conexiones entre categorías (Estrategia A: matrices 6.2.1-6.2.3; estrategia B: matrices 6.3.1-6.3.3, o estrategia C: matrices 6.4.1-6.4.3).

La Figura 6.4 pone de manifiesto la conveniencia de una solución tridimensional para los TN, en la que se pueden etiquetar claramente las dimensiones obtenidas como *rojo-verde*, *amarillo-azul*, y *claridad*. Sin embargo, y a pesar de las inevitables distorsiones asociadas, resulta de gran utilidad comparar la solución bidimensional obtenida en TN con la obtenida en protanopes y deuteranopes (Figura 6.3).

Tal comparación permite establecer una diferencia fundamental entre los espacios de color reconstruidos para los tres grupos de observadores: mientras que las dos dimensiones surgidas a partir del MDS aplicado a los datos de los TN son cromáticas (D1: *rojo-verde*, D2: *amarillo-azul*), únicamente la primera de las dos dimensiones derivadas del MDS, tanto en protanopes como en deuteranopes, parece ser interpretable de dicha manera, siendo la segunda fácilmente interpretable como una dimensión *acromática* (*blanco y amarillo* se sitúan en un extremo de esta dimensión, mientras que *negro* se sitúa en el otro).

Este resultado apoya la interpretación de que, en el uso de las CCB, la claridad toma una relevancia especial en dicrómatas, importancia que no es tan vital en TN (Boynton y Scheibner, 1967; Bimler, Paramei y Cavonius, 1998). Además de esta diferencia fundamental, es importante recalcar el hecho de que, a pesar de que la primera dimensión obtenida en protanopes y deuteranopes es cromática, no puede ser etiquetada de forma tan simple como en el caso de las dos dimensiones cromáticas subyacentes en los TN. Una posible explicación sería que a esta primera dimensión no sólo subyace el funcionamiento del mecanismo cromático *amarillo-azul*, sino que de alguna manera recoge en parte el funcionamiento del mecanismo *rojo-verde* residual.

Otro de los resultados más importantes de esta investigación, deriva del análisis de las **características colorimétricas de los errores** cometidos. Gracias al mismo, ha sido posible abordar uno de los objetivos planteados en esta tesis: evaluar la adecuación de dos modelos diferentes (denominados A y B) en el ámbito de la predicción de los errores que pueden cometer observadores dicrómatas cuando utilizan TCB. Los dicrómatas estudiados en esta tesis han sido daltónicos (protanopes y deuteranopes), pero en principio, los Modelos A y B podrían del mismo modo intentar concretarse y evaluarse en tritanopes.

Ambos modelos suponen, en distinta medida, la evolución de un primer modelo de predicción de errores en dicrómatas (que denominaremos modelo equiprobable), evolución lograda gracias a la investigación empírica desarrollada a lo largo de los últimos años, y que puede resumirse de la siguiente manera (consúltase la Tabla 6.37):

1. Modelo equiprobable.

- 1.1. Lógica del modelo.** Este es el modelo propuesto en el trabajo de Lillo, Davies et al. (2001; Modelo 1 en Lillo, Vitini et al., 2001). Supone el punto de partida para intentar poner en relación el conocimiento sobre 1) la visión del color en daltónicos dicrómatas y 2) el uso que estos hacen de los TCB (los aspectos esenciales de este modelo han sido descritos en el apartado 1.4.2.1).
- 1.2. Formalización del modelo.** La clave de este modelo es que, como respuesta a un estímulo x , propone una distribución de probabilidad uniforme, $p(i_{D_x}) = \text{uniforme}(\pi_{D_x} = 1/n)$, donde $p(i_{D_x})$ es la probabilidad de emplear la categoría i para denominar el estímulo x por parte del tipo de dicrómata D , y n es el número de categorías cuyo volumen colorimétrico es intersecado por la línea que definen el estímulo x y el punto de confusión correspondiente.
- 1.3. Evaluación del modelo.** Si bien a nivel cualitativo este modelo se mostró capaz de predecir la mayor parte del tipo de los errores cometidos, lo hizo a expensas de sobreestimar su número. Además, no logró un buen ajuste de la distribución del número de errores por categoría ($r = 0,42$ para protanopes y $r = 0,43$ para deuteranopes, Lillo, Davies et al. 2001). La evolución de este modelo equiprobable hacia otro que se ajustase mejor a los datos empíricos, ha llevado a contrastar en la presente tesis la adecuación de los denominados Modelos A y B:

2. Modelo A.

- 2.1. Lógica del modelo.** Sin introducir ninguna variable nueva, el modelo anterior se puede refinar, tal y como se ha hecho en la presente tesis, según la concreción del que hemos denominado Modelo A. La consecuencia clave es que el modelo deja de ser equiprobable.
- 2.2. Formalización del modelo.** La clave de este modelo es que, para un estímulo x , mediante interpolación, se asigna un determinado grado de compatibilidad con la categoría i para el tipo de dicrómata D , $p(x_{D_i})$, de forma que $p(x_{D_i}) = a_{x_{D_i}}$, donde $a_{x_{D_i}} = f(L^*_{x_{D_i}})f(s_{x_{D_i}})$ es el resultado de combinar los ajustes de sendas funciones polinómicas para describir la relación existente, para cada categoría i , y tipo de dicrómata D , entre 1) la frecuencia de selección de los aciertos, y 2) $L^*_{x_{D_i}}$, y $s_{x_{D_i}}$ (la claridad y la saturación transformadas computadas para el estímulo x y el tipo de dicrómata D).

2.3. Evaluación del modelo. En la presente investigación se ha recogido evidencia empírica de que el Modelo A presenta ventajas, como la similitud existente entre los errores empíricos y los errores esperables, tanto en lo que se refiere a sus características colorimétricas (transformadas), como en lo referente a las asimetrías de los errores. Sin embargo, y de forma similar a como ocurría con el modelo equiprobable, el Modelo A también sobreestima el porcentaje del número de errores (tanto en general como para la mayoría de las categorías), aunque mejora el ajuste referente a la distribución del número de errores por categoría ($r = 0,78$ en protanopes, y $r = 0,79$ en deuteranopes).

3. Modelo B.

3.1. Lógica del modelo. Examinando con detalle los desajustes exhibidos por el Modelo A a la hora de explicar el comportamiento empírico de daltónicos dicrómatas, queda claro que la sobreestimación de los errores no es de carácter uniforme. Es precisamente la cuantificación de la relación existente entre la probabilidad de error y la variable ΔRG_{res} , que pretende estimar indirectamente la magnitud de la discriminación residual *rojo-verde*, la característica esencial que permite concretar formalmente el Modelo B.

3.2. Formalización del modelo. El modelo se concreta formalmente mediante la expresión $p(x_{D_i}) = a_{x_{D_i}} \cdot e^{-b_D \Delta RG_{res, x_{D_i}}}$, donde $p(x_{D_i})$ y $a_{x_{D_i}}$ conservan exactamente el mismo significado que tienen en el Modelo A, y $e^{-b_D \Delta RG_{res, x_{D_i}}}$ supone por tanto la parte novedosa del Modelo B, siendo $\Delta RG_{res, x_{D_i}}$ la distancia entre las coordenadas cromáticas del estímulo x y el prototipo de la categoría i , medida a lo largo de la línea de confusión correspondiente al tipo de dicrómata D .

3.3. Evaluación del modelo. La evidencia empírica es consistente con que el Modelo B se ajusta mucho mejor a los datos que el Modelo A (Tabla 6.31), en diferentes aspectos como 1) la distribución de aciertos y errores (tanto a nivel general como para la mayoría de las categorías), 2) la distribución del número de errores por categoría ($r = 0,89$ en protanopes, y $r = 0,91$ en deuteranopes), 3) la distancia entre los centroides empíricos y los predichos (Figura 6.18 y Tablas 6.30.1-6.30.3, y 6.32.1-6.32.2), y 4) el grado de ajuste entre las matrices de confusión empíricas y las predichas (Tabla 6.33). 5) Además, a nivel individual, la comparación entre el grado de ajuste de los modelos A y B a las matrices de confusión empíricas, permite concretar el incremento de

proporción de varianza conseguido gracias a la inclusión de discriminación *rojo-verde* residual en el modelo de predicción de errores (Tabla 6.34).

En resumen, los Modelos A y B permiten, para cualquier estímulo x , estimar cuantitativamente el grado de compatibilidad con cualquier categoría i para el tipo de dicrómata D . Pero mientras el Modelo A únicamente tiene en cuenta dos variables, de forma acorde con la hipótesis de la reducción (apartado 1.3.1), el Modelo B incluye una tercera, que pretende estimar el grado de discriminación residual *rojo-verde*.

Algo común a ambos modelos, es que su formulación incluye información importante relativa a las diferentes CCB. Para ejemplificar la importancia de este aspecto, recurriremos a exponer la facilidad con la que podrían malinterpretarse los resultados derivados de uno de los trabajos comentados con anterioridad. Cole et al. (2006), ofrecieron una estimación cuantitativa de la relación existente entre el tamaño de los estímulos y la probabilidad de error. Sin embargo, no matizaron esta relación en función de las diferentes categorías. Esto supone que aplicarla a la categoría *amarillo* resulta completamente erróneo, puesto que dicha categoría no recibió ninguna denominación incorrecta. En el otro extremo, llevaría a pensar que los errores cometidos con *marrón* podrían reducirse a un 6%, simplemente presentando muestras de gran tamaño visual.

Tal y como se formulan los modelos A y B en esta tesis, se evita el riesgo de interpretar incorrectamente los resultados, puesto que en ambos se incluye explícitamente información relativa a la categoría i , cuyo grado de compatibilidad con el estímulo x está siendo computada. Por esta razón, el ajuste de las predicciones relativas a la distribución del porcentaje de aciertos y de errores para *amarillo* (consúltese la Tabla 6.33) resulta muy similar para los Modelos A y B: puesto que el uso de *amarillo* está íntimamente ligado a altos niveles de claridad en colores de superficie, la inclusión de discriminación residual *rojo-verde* que aporta el Modelo B apenas puede mejorar el ajuste de las predicciones del Modelo A, por la sencilla razón de que a niveles tan altos de claridad no hay estímulos muy alejados en la dimensión ΔRG_{res_D} . Evidentemente, igual ocurre con *blanco*. Y todo lo contrario ocurre con categorías como *rojo* o *verde*.

Tabla 6.37. Comparación resumida de los aspectos fundamentales de tres modelos diferentes de predicción de errores en dicrómatas. El Modelo equiprobable se evaluó en el trabajo de Lillo, Davies et al. (2001), y en Lillo, Vitini et al. (2001). Los Modelos A y B han sido desarrollados y evaluados en la presente investigación. Subíndice D : (daltónico) dicrómata.

	Modelo equiprobable	Modelo A	Modelo B
Variables que contempla el modelo	<ul style="list-style-type: none"> 1. Factor de luminancia transformado (Y_D) 2. Pendiente de la línea de confusión (a_D) 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Claridad transformada (L^*_D)[#] 2. Saturación transformada (s_D)[#] 	<ul style="list-style-type: none"> 1. Claridad transformada (L^*_D)[#] 2. Saturación transformada (s_D)[#] 3. Discriminación residual rojo-verde (ΔRG_{resD})
Tradición en la que puede encuadrarse	Tradición de Jameson y Hurvich (1978)		Tradición de Scheibner y Boynton (1967)
Formalización	$p(i_{D_x}) = \text{uniforme}(\pi_{D_x} = 1/n)$	$p(x_{D_i}) = a_{x_{D_i}}^{(1)}$	$p(x_{D_i}) = a_{x_{D_i}} \cdot e^{-b_D \Delta RG_{res, x_{D_i}}}$ (2)
Evaluación	<ul style="list-style-type: none"> Sobreestima el número de errores No predice adecuadamente la distribución del número de errores por categoría ($r_p = 0,42$; $r_d = 0,43$) 	<ul style="list-style-type: none"> Sobreestima el número de errores Predice la distribución del número de errores por categoría mejor que el modelo equiprobable ($r_p = 0,78$; $r_d = 0,79$) Predice erróneamente la localización de algunos centroides Reproduce erróneamente las filas de la matriz de confusión que se corresponden con algunas categorías 	<ul style="list-style-type: none"> Predice mucho mejor el número de errores Es el modelo que mejor predice la distribución del número de errores por categoría ($r_p = 0,89$; $r_d = 0,91$) Predice mucho mejor la localización de los centroides que el Modelo A Reproduce mucho mejor la matriz de confusión que el Modelo A Permite estimar la importancia de la discriminación residual rojo-verde a nivel individual

[#]: Recuérdese que L^*_D es una función monótona creciente de Y_D . De la misma forma, s_D es una función monótona decreciente de a_D . Esto significa que los análisis de datos cuyos resultados se muestran en las Tablas 6.22-25, al haberse efectuado mediante una técnica no paramétrica que trata los datos conforme a las propiedades de una escala ordinal, son idénticos a los que se obtienen si se emplea Y_D en lugar de L^*_D , o s_D en lugar de a_D . Para más detalles: $L^*_D = 116 \cdot (Y_D/Y_n)^{1/3} - 16$. Respecto a s_D , recuérdese que se calcula simplemente como la distancia entre el punto acromático y la intersección de la línea de confusión del estímulo de interés y una de las dos líneas siguientes: a) la definida por el punto acromático y las coordenadas cromáticas correspondientes a 575 nm, b) la definida por el punto acromático y las coordenadas cromáticas correspondientes a 475 nm. Si la intersección de la línea de confusión ocurre con b), y con el objeto de que s_D sea una función monótona decreciente de a_D se cambia el signo de s_D .

(1): $a_{x_{D_i}} = f(L^*_{x_{D_i}})f(s_{x_{D_i}})$, donde

$$f(L^*_{x_{D_i}}) = b_{i0} + b_{i1}L^*_{x_{D_i}} + b_{i2}L^{*2}_{x_{D_i}} + \dots + b_{in}L^{*n}_{x_{D_i}}, \text{ y}$$

$$f(s_{x_{D_i}}) = c_{i0} + c_{i1}s_{x_{D_i}} + c_{i2}s^2_{x_{D_i}} + \dots + c_{in}s^n_{x_{D_i}}$$

$$(2): \Delta RG_{res} = \left| \sqrt{(u'_f - u'_c)^2 + (v'_f - v'_c)^2} - \sqrt{(u'_f - u'_c)^2 + (v'_f - v'_c)^2} \right|$$

Después de haber mencionado los aspectos fundamentales de ambos modelos, pasemos a examinar con cierto detalle el ajuste del Modelo A a los datos, para luego compararlo con el logrado por el Modelo B.

La comparación de los errores cometidos con los errores esperados, determinados a partir de las predicciones del Modelo A, confirmó una gran concordancia entre ambos tipos de error, tanto en la pendiente de las líneas de confusión asociadas, como en la claridad transformada. La Tabla 6.24 muestra que, en protanopes, únicamente se encontraron diferencias estadísticamente significativas para *naranja* (tanto en pendiente protán como en claridad protanope), *rosa* y *morado* (únicamente en claridad protanope). En deuteranopes, como puede observarse en la Tabla 6.25, sólo existieron diferencias significativas para *marrón*, *rosa* (únicamente en pendiente deután), *naranja*, *gris* y *verde* (sólo en claridad deuteranope).

Resulta de gran interés subrayar que, por el contrario, de la comparación entre aciertos y errores (Tablas 6.22 y 22), resultan bastantes más diferencias estadísticamente significativas, algunas de las cuales son muy destacables. Tal vez la disociación más clara ocurre con *amarillo* y con *azul*, tanto en protanopes como en deuteranopes. Para estas categorías, puede observarse nítidamente que los aciertos y los errores se diferencian (además de las Tablas 6.22 y 22, obsérvense las Figuras 6.12E, 6.12F, 6.13E y 6.13F). Y sin embargo, no existen diferencias entre los errores cometidos y los esperados (Tablas 6.24 y 6.25). Es decir, los errores cometidos sí que son esperables a partir de las predicciones del Modelo A, pero, como consecuencia de las características colorimétricas de la muestra de colores de superficie empleada, derivadas de las del propio atlas NCS, estos errores resultan ser menos saturados que los aciertos (en términos de $|s_D|$), algo que se puede observar con claridad en la Figura 6.14.

Parece pues que existe una gran concordancia entre los errores cometidos y las predicciones realizadas a partir del Modelo A para las CCB primarias: *blanco*, *negro*, *rojo*, *verde*, *amarillo* y *azul* (consúltese el apartado 1.4.1.2.). De hecho, la única diferencia estadísticamente significativa se dio para *verde*, únicamente para la claridad transformada en deuteranopes, y dicha diferencia no fue muy significativa en términos colorimétricos (4,39 unidades L^*p). Por el contrario, para las CCB derivadas (*marrón*, *rosa*, *naranja*, *morado* y *gris*), existió un mayor número de diferencias.

Con el objeto de examinar la importancia de las diferencias estadísticamente significativas encontradas, se estudió el *tamaño del efecto* asociado a los contrastes realizados. Como medida del mismo se tomó el coeficiente de correlación r de Pearson (Pardo y San Martín, 2006), siguiendo las recomendaciones establecidas por Cohen (1992) para su interpretación (pequeño, $r \approx 0,10$; medio, $r \approx 0,30$; grande, $r \approx 0,50$). En todos los casos, el tamaño del efecto fue medio o grande, con una única excepción, que resulta muy consecuente con lo dicho anteriormente: para el contraste referido a la claridad transformada de *verde* en deuteranopes, se obtuvo un valor $r = 0,11$, mostrando que el tamaño del efecto fue pequeño.

Por último, para sondear la importancia de las diferencias estadísticamente significativas en términos colorimétricos (y no estadísticos), se examinó directamente la diferencia entre las medianas de las distribuciones de los errores cometidos y esperados (Tablas 6.24 y 6.25), tanto para la variable pendiente de la línea de confusión, como para la variable claridad transformada.

En cuanto al parámetro a (pendiente de la línea de confusión), en el caso de *rosa* en deuteranopes, la magnitud de la diferencia, dentro del rango total de pendientes, supone únicamente un 3,14% (4,33/138). Sin embargo, en el caso de *naranja* en protanopes, y sobre todo en el caso de *marrón* en deuteranopes, la diferencia se muestra más acusada, suponiendo un 6,68% (23,57/353) y un 11,90% (16,42/138) de los respectivos rangos totales.

En el caso de la claridad transformada⁴, las diferencias encontradas pueden considerarse en algunos casos pequeñas, al estar próximas a las ± 5 unidades (4,49 para *verde* en deuteranopes, y -5,42 para *rosa* en protanopes). En otros casos, fueron moderadas, en torno a las ± 10 unidades (-9,05 para *naranja* en deuteranopes, y 12,30 para *gris* en deuteranopes), y por último, en otros casos pueden considerarse indudablemente grandes, al encontrarse en torno a las ± 20 unidades (-17,11 para *naranja* y 23,03 para *morado* en protanopes).

⁴ Recuérdese que, aunque idealmente, esta escala toma valores comprendidos entre 0 y 100, en la muestra empleada $L^* = 92,31$ para la muestra S 0500-N, y $L^* = 17,96$ para la muestra S 9000-N. Recuérdese del mismo modo que, al tratarse de estimulación acromática, este rango se mantiene prácticamente invariable para protanopes y deuteranopes.

Otro de los aciertos del Modelo A es poder ofrecer una explicación parsimoniosa para un resultado muy importante encontrado en esta investigación: la asimetría que muestran los errores para algunos pares de categorías. Efectivamente, la mayor parte de las asimetrías registradas a nivel empírico son coherentes con las predicciones de dicho Modelo.

Esto equivale a decir que las asimetrías encontradas pueden interpretarse como una consecuencia lógica derivada de la coexistencia de dos factores: 1) las confusiones cromáticas propias de los observadores dicrómatas, y 2) las características colorimétricas del mapa de las CCB en los colores de superficie. No parece pues muy razonable, a partir de los datos, acudir a razones de otra índole (es decir, a procesos propios de los procesos de categorización del color, y ajenos, o hasta cierto punto independientes, de procesos de discriminación).

Por lo tanto, el Modelo A presenta **puntos fuertes**, que pueden resumirse en que, a partir de la comparación entre los errores cometidos y los errores esperados según dicho modelo, se derivan los dos resultados fundamentales siguientes:

1. Existe una gran similitud entre ambos tipos de error en las variables colorimétricas analizadas (sobre todo para las CCB primarias).
2. Existe una gran concordancia entre las asimetrías de los errores registradas a nivel empírico y las esperables.

Sin embargo, es igualmente indiscutible que el Modelo A presenta serias **desventajas**, reveladas por la existencia de desajustes evidentes con los datos:

1. En primer lugar, aunque la naturaleza de los errores sea en parte coherente con las predicciones del Modelo A, no queda lugar a dudas de que dicho modelo **sobreestima el número de errores** que cometen protanopes y deuteranopes, tanto en general como para la mayoría de las categorías, tal y como confirman las pruebas estadísticas de bondad de ajuste.
2. En segundo lugar, **esta sobreestimación no es de carácter uniforme**, aspecto de vital importancia que ha quedado suficientemente claro a través de diferentes niveles de análisis:

- 2.1. *Mediante inspección visual, a partir diagrama de cromaticidad $CIE_{u'v'}$ 1976.* (Consúltense a tal efecto la Figura 6.15).
- 2.2. *Mediante la comparación de centroides computados en el espacio CIELUV.*
Comparando los centroides empíricos de las CCB con los computados a partir de los estímulos compatibles según el Modelo A (Figura 6.16 y Tablas 6.27.1 y 6.27.2), resulta evidente que, sobre todo para algunas categorías, como *rojo* y *verde*, existe un gran desajuste entre ambas clases de centroides: de la misma forma que ocurriera en los trabajos de Montag y Boynton (1987) y Montag (1994), (que trabajaron con el atlas OSA), la localización de los centroides fue muy diferente de la que se esperaría a partir del Modelo A.
- 2.3. *A nivel categórico.* Analizando comparativamente la distribución de los porcentajes de error entre las matrices de confusión empíricas (Tablas 6.26.1 y 6.26.2) y predichas a partir del Modelo A (Tablas AI.1.1 y AI.1.2), puede constatar que algunos porcentajes de error no fueron sobreestimados, como por ejemplo *verde-marrón* o *verde-amarillo*, mientras que otros lo fueron ampliamente, como *verde-naranja* o *verde-rojo* (esto ocurrió para ambos tipos de dicrómatas).

Los puntos 2.1-2.3 resaltan el hecho de que la sobreestimación de los errores del Modelo A no es uniforme, y aportan una clara evidencia para discernir en qué sentido se viola dicha uniformidad, ya que apuntan en la dirección de que existe cierto grado de discriminación residual *rojo-verde*. Esta interpretación es perfectamente compatible con lo que se conoce sobre el comportamiento de estos observadores cuando el tamaño de los estímulos presentados es $\geq 3^\circ$ (consúltense los apartados 1.3.1.1 y 1.4.2.1). Esta discriminación residual, que desvela las limitaciones del que aquí hemos denominado Modelo A, se ha puesto de manifiesto en diversas situaciones experimentales, que emplean procedimientos tan diferentes como 1) la igualación de colores (por ejemplo, Smith y Pokorny, 1973; Nagy, 1980) o 2) la denominación de color, tanto con estímulos monocromáticos, como de superficie (consúltense las Tablas 4.8 y 4.9, respectivamente).

Los estímulos empleados en la presente investigación proyectaban un tamaño visual de $4^\circ \times 4^\circ$, razón por la cual no resulta sorprendente el haber encontrado evidencias a favor de la existencia de cierta discriminación residual *rojo-verde*.

Lo realmente novedoso, en este sentido, y que puede servir para complementar de alguna manera trabajos anteriores, es presentar una relación cuantitativa entre la probabilidad de error y una estimación indirecta de la magnitud de la actividad del mecanismo *rojo-verde* residual, ΔRG_{res} . Podemos asegurar por tanto que en la Figura 6.17 se representa otro de los resultados más importantes de esta tesis: la existencia de una relación inversa entre la probabilidad de error y ΔRG_{res} .

Este hecho pone de manifiesto que 1) estímulos que muestran una compatibilidad máxima, $p(x_{D_i}) = a_{x_{D_i}} \approx 1$, y que por lo tanto, a partir de las predicciones del Modelo A, deberían ser (aproximadamente) metaméricos de otros estímulos, de hecho no resultan serlo, y 2) la distancia a lo largo de la línea de confusión se muestra como una variable de relevancia extrema de cara a explicar dicho resultado. Las razones sobre las que se sustenta la elección de ΔRG_{res} para estimar de forma indirecta la actividad residual del mecanismo *rojo-verde* son, como se ha comentado en el apartado de resultados: 1) que permite aislar la actividad asociada a dicho mecanismo, descontado el efecto de las dos dimensiones relevantes según los modelos de visión dicrómata estándar, y 2) que lo hace en términos de distancias en un diagrama de cromaticidad, asociándola por tanto a un proceso de discriminación y sin asumir ninguna sensibilidad espectral concreta que la sustente, ni recurrir a supuestos externos referidos a la apariencia de color.

Como se ha hecho explícito con anterioridad, la cuantificación de la relación existente entre la probabilidad de error y ΔRG_{res} sienta las bases para una concreción del Modelo B, que además de basarse en líneas de confusión y claridad transformada, incluye una estimación indirecta de la magnitud de la discriminación residual *rojo-verde*.

Salvo excepciones muy concretas, las predicciones del Modelo B se ajustan a los datos empíricos de la tarea de mapa de colores mucho mejor que las predicciones del Modelo A (Tablas 6.31 y 6.37). Analizando los casos (claramente minoritarios) en los

que el ajuste logrado por el Modelo A resulta superior al conseguido por el Modelo B, encontramos la siguiente regularidad: en todos ellos, las pruebas de bondad de ajuste muestran que, mientras que el Modelo A predice correctamente la distribución global de aciertos y errores, el Modelo B sobreestima el porcentaje de aciertos (Tabla 6.31). Analicemos estos casos uno por uno:

- *Marrón (protanopes y deuteranopes)*. Esta es la única categoría para la que se da el patrón mencionado en ambos tipos de dicrómatas. Sin embargo, esta aparente superioridad del Modelo A resulta en parte engañosa, y debe ser matizada:
 - En primer lugar, el centroide de *marrón* computado a partir del **Modelo B**, se acerca más al empírico que el centroide predicho por el Modelo A. La Tabla 6.30.1 muestra este resultado para protanopes: $\Delta E^*_{uv1} = 18,47 > \Delta E^*_{uv2} = 8,76$ (en la Tabla 6.32.1 puede consultarse que para la dimensión u^* se encontraron diferencias estadísticamente significativas al comparar los datos empíricos con las predicciones del Modelo A, pero no al compararlos con las del Modelo B). La Tabla 6.30.2 indica este mismo resultado para deuteranopes: $\Delta E^*_{uv1} = 13,70 > \Delta E^*_{uv2} = 7,68$.
 - En segundo lugar, el análisis de la relación lineal existente entre la distribución empírica del porcentaje de aciertos y errores de *marrón*, y las distribuciones predichas por los Modelos A y B (Tabla 6.33), muestra un mejor ajuste de las predicciones del **Modelo B** (protanopes: $R^2_{AE} = 0,89 < R^2_{BE} = 0,96$; deuteranopes: $R^2_{AE} = 0,93 < R^2_{BE} = 0,96$). Fundamentalmente, el ajuste superior del Modelo B se debe a la reducción en el porcentaje predicho de errores *marrón-rojo* que supone la aplicación del Modelo B con respecto al Modelo A.
- *Naranja (protanopes)*. La superioridad del ajuste lograda por el Modelo A frente al Modelo B resulta más clara en este caso, si bien también debe matizarse:
 - El centroide de *naranja* computado a partir del **Modelo A** se acerca más al centroide empírico, como se muestra en la Tabla 6.30.1, pero lo hace muy ligeramente: $\Delta E^*_{uv1} = 13,43 < \Delta E^*_{uv2} = 15,80$ (la Tabla 6.32.1 muestra que para la dimensión u^* no se encontraron diferencias

- estadísticamente significativas al comparar los datos empíricos con las predicciones del Modelo A, pero sí al hacerlo con las del Modelo B⁵).
- Sin embargo, la distribución del porcentaje de aciertos y errores predicha por el **Modelo B**, se ajusta mejor a los datos (Tabla 6.33): $R^2_{AE} = 0,73 < R^2_{BE} = 0,80$, debido fundamentalmente a la reducción del porcentaje predicho de errores *naranja-marrón* y sobre todo *naranja-verde*.
 - De hecho, la mayor discrepancia entre las predicciones y los datos, muy importante en términos cuantitativos, es el elevado porcentaje empírico asociado al error *naranja-amarillo* (26,35%), impredecible a partir de las concreciones tanto del Modelo A como del Modelo B.
 - *Morado (protanopes)*. Este es el único caso en el que la superioridad del ajuste logrado por el Modelo A sobre el Modelo B es patente:
 - El centroide de *morado* computado a partir del **Modelo A** se acerca más al centroide empírico, como se muestra en la Tabla 6.30.1, pero como en caso anterior lo hace muy ligeramente: $\Delta E^*_{uv1} = 4,49 < \Delta E^*_{uv2} = 5,26$.
 - La distribución del porcentaje de aciertos y errores predicha por el **Modelo A** muestra un mejor ajuste a los datos (Tabla 6.33): $R^2_{AE} = 0,99 > R^2_{BE} = 0,94$. Este mejor ajuste se debe fundamentalmente a que la reducción del porcentaje predicho de errores *morado-azul* que supone el Modelo B de hecho no se corresponde con los datos empíricos.

A raíz del análisis de estos casos, puede establecerse el siguiente razonamiento.

- 1) Por definición, comparado con el Modelo A, el Modelo B únicamente puede reducir (nunca aumentar) el número de errores que se predicen para una determinada categoría.
- 2) Por lo tanto, en aquellos casos en los que el Modelo A predice adecuadamente la distribución del porcentaje de aciertos y errores, las predicciones del Modelo B únicamente pueden mantener este resultado (como ocurre con *blanco* y *amarillo* en protanopes, y *azul* en deuteranopes), o sobreestimar el porcentaje de aciertos, como ocurre en los casos señalados anteriormente.
- 3) Cabría preguntarse por qué en estos casos el Modelo A predice adecuadamente la distribución del porcentaje de aciertos y errores. En parte, como ha quedado claro, esto se produce a expensas de que la

⁵ Analizando el tamaño del efecto de las diferencias estadísticamente significativas encontradas en las distintas dimensiones colorimétricas, se comprobó que el asociado a la diferencia encontrada en u^* entre las predicciones del Modelo B y los datos empíricos (para *naranja* en protanopes) fue pequeño ($r = 0,17$). De hecho, este fue el tamaño del efecto más pequeño de todos los calculados para la dimensión u^*).

predicción que hace el Modelo A de la distribución de los errores entre categorías resulta peor que la que hace el Modelo B. Únicamente en el caso de *morado* en protanopes las predicciones del Modelo A resultan más acertadas que las del Modelo B.

Llegados a este punto, resulta conveniente aclarar algunos aspectos relacionados con la forma concreta en la que se han formalizado los Modelos A y B. En primer lugar, cabría preguntarse hasta qué punto resulta adecuado combinar la información de las variables claridad y saturación transformadas según la expresión $a_{x_{D_i}} = f(L^*_{x_{D_i}})f(s_{x_{D_i}})$. Dicha expresión indica que las funciones polinómicas ajustadas se combinan de forma multiplicativa. Podría haberse empleado otro tipo de combinación (por ejemplo una combinación lineal ponderando según el grado de ajuste de cada función por separado). Para esta primera formalización del Modelo A, se optó por la combinación de tipo multiplicativo. Debe tenerse en cuenta que la expresión $a_{x_{D_i}} = f(L^*_{x_{D_i}})f(s_{x_{D_i}})$ se mantiene invariante en el Modelo B. Por supuesto, la representatividad de las funciones ajustadas depende directamente del muestreo estimular empleado, por lo que es de esperar que un aumento en el número de estímulos muestreados mejore la representatividad de cada una de las categorías, y por tanto la de las funciones ajustadas.

En segundo lugar, para modelar la relación existente entre la probabilidad de error y ΔRG_{res} , paso previo a la formalización del Modelo B, se optó por ajustar la expresión $p(error) = e^{-bRG_{res}}$. Es decir, se optó por estimar un único parámetro, el exponente b , fijando $A = 1$ en la expresión más general $p(error) = Ae^{-bRG_{res}}$. La razón por la cual se tomó esta decisión, es simplemente porque el valor de la probabilidad no puede exceder de 1. En otras palabras, la probabilidad de seleccionar el estímulo x dentro de la categoría i por el tipo de dicrómata D será 1 cuando $\Delta RG_{res, x_{D_i}} = 0$, pues en tal caso el estímulo x sería el prototipo de la categoría i . Por último, cabría preguntarse por qué se tomó el prototipo de las distintas categorías para definir ΔRG_{res} . La respuesta es que otras opciones, como por ejemplo tomar el centroide, no resultan a priori tan idóneas, porque el centroide no es tan representativo de una categoría como lo es su prototipo (Montag y Boynton, 1987; Lillo et al., 2007).

El hecho de que el Modelo B muestre un ajuste considerablemente mejor a los datos, parece indicar la necesidad de incluir discriminación *rojo-verde* residual para explicar el comportamiento de los observadores dicrómatas, al menos bajo las condiciones de observación empleadas en el presente estudio. En este modelo, del parámetro b , contenido en la expresión $e^{-b_D \Delta RG_{res, x_{D_i}}}$ (y estimado a partir de los datos recogidos en esta investigación, véase la Tabla 6.28), depende la tasa a la que la probabilidad de error decae según los estímulos se alejan a lo largo de la línea de confusión correspondiente.

En este sentido, el Modelo A puede considerarse un caso particular del Modelo B cuando $b = 0$. A mayor valor de b , mayor grado de discriminación residual. Evidentemente, el valor de dicho parámetro estará en función de diversas variables, lugar destacado entre las cuales deben ocupar, por su indiscutible importancia⁶:

- *El tamaño estimular.* Los estímulos presentados proyectaban un ángulo visual de 4°. Es de esperar que el valor del parámetro b dependa del tamaño, tratándose de una cuestión empírica establecer la relación existente entre ambos. En principio, cabría esperar que, hasta cierto punto, mientras mayor sea el tamaño estimular, mayor será el valor de b (recuérdese la investigación de Cole et al., 2006).
- *Las diferencias individuales.* La estimación del parámetro b se ha efectuado a partir de los datos de los dos grupos de dicrómatas agregados, y para protanopes y deuteranopes por separado, pero siempre a nivel grupal. Ya se ha comentado anteriormente que las matrices de confusión derivadas de la aplicación del Modelo B, en comparación con las derivadas a partir del Modelo A, logran un mejor ajuste a las matrices de confusión individuales para la mayoría de los observadores, pero no para todos. Es interesante resaltar que, en distintos trabajos de la literatura especializada sobre la discriminación residual *rojo-verde* en dicrómatas, se han encontrado con regularidad resultados análogos. Así, por ejemplo, tal y como se comentó en el apartado 1.4.2.1, el protanope TJ en

⁶ Los valores de R^2 obtenidos al estimar el valor del parámetro b (por ejemplo $R^2 = 0,581$, obtenido para la expresión $p(error) = e^{-10,93 \Delta RG_{res}}$) deben interpretarse, evidentemente, dentro de las características de la presente situación experimental. Teniendo en cuenta aspectos como el muestreo de los estímulos, su presentación simultánea durante la realización de la tarea, y la existencia de diferencias individuales, resulta especialmente destacable que casi el 60% de la varianza en la proporción empírica de error (para estímulos de máxima compatibilidad según el Modelo A) sea explicable a partir de una única variable, ΔRG_{res} .

Scheibner y Boynton (1968), o el protanope KE en Nagy y Boynton (1979), exhibieron un comportamiento mucho más acorde al esperable a partir de la hipótesis de la reducción que el que se esperaría a partir de la existencia de cierto grado de discriminación residual *rojo-verde*. Lo mismo puede decirse de los observadores P1: LEL, P7: JJMC, y D7: JP en la presente investigación (consúltese la Tabla 6.34). Más tarde volveremos a tratar este tema.

Siendo las dos anteriores, presumiblemente, las variables más relevantes, es posible que otros aspectos puedan limitar la generalizabilidad de los resultados obtenidos a otros diseños experimentales y/o a otros observadores.

Entre otros, cabría mencionar aspectos relacionadas con las condiciones de observación más allá del tamaño estimular (por ejemplo el contraste simultáneo debido a la forma de presentar los estímulos), o la tarea empleada (selección de estímulos en lugar de denominación).

Como se describió en el apartado 1.4.2.1, estos modelos podrían, respectivamente, encuadrarse en las que allí denominamos tradición de Jameson y Hurvich (1978), y tradición de Scheibner y Boynton (1967) (Tabla 6.37). Jameson y Hurvich (1978) razonaron que, a la hora de categorizar el color, los dicrómatas podrían hacer uso de pequeñas diferencias perceptivas, señalando especialmente las provenientes de la claridad. Años más tarde, Montag (1994), retomó esta misma idea, al señalar que los dicrómatas “*podrían haber aprendido a categorizar los colores basándose en diferencias perceptivas muy pequeñas*” (p. 2150) (texto también citado, por cierto, por Cole et al., 2006, p. 886), pero la enriqueció dotándola de un contenido diferente, al postular la existencia de una discriminación *rojo-verde* residual.

El análisis que se presenta en esta tesis sobre cómo la distancia a lo largo de la línea de confusión reduce exponencialmente la probabilidad de error, puede considerarse, creemos, una confirmación (en términos muy concretos) de esta hipótesis.

Quedaría plantearse cuál es el mecanismo subyacente mediante el cual, personas que son diagnosticadas como daltónicos dicrómatas después de aceptar todo el rango de ajustes tipo Rayleigh en el anomaloscopio, son no obstante capaces de emplear los TCB con bastante más acierto de lo que cabría esperar a partir de la hipótesis de la reducción

(aquí concretada en el Modelo A). Evidentemente, las características de la presente investigación no permiten responder a esta pregunta, como se ha puesto de manifiesto al explicar las razones que han fundamentado la elección de ΔRG_{res_D} como la tercera variable que incluye el Modelo B. Como se comentó en el apartado 1.3.1.1, los mecanismos propuestos para explicar esta aparente disociación son tan variados como (pueden consultarse al respecto, entre otras, las siguientes referencias: Boynton y Scheibner, 1967; Scheibner y Boynton, 1968; Smith y Pokorny, 1977; Nagy y Boynton, 1979; Nagy, 1980; Breton y Cowan, 1981; Montag, y Boynton, 1987; Crognale, Teller, Yamaguchi, Motulsky y Deeb, 1999; Sharpe et al., 1999; Wachtler, Dohrman y Hertel, 2004; Forte, Blessing, Buzás y Marton, 2006):

La contribución 1) de los bastones, 2) de los conos S, o 3) de un tercer fotopigmento residual; 4) las diferencias en la densidad óptica entre los conos de la fovea y de la periferia, 5) la inhomogeneidad espacial del pigmento macular, 6) los cambios en la geometría y en la orientación de los receptores con la excentricidad, 7) la existencia de diferencias estructurales en los conos más allá del tipo de fotopigmento que contienen, 8) la influencia de la aberración cromática, y 9) la contribución de algún tipo de compresión en la respuesta de los conos.

Del análisis de la variable **frecuencia de selección** se extrajeron dos resultados importantes. El primero de ellos se refiere a la existencia de diferencias intergrupo estadísticamente significativas (Figura 6.8), y sirve como réplica y ampliación de los resultados aportados por Bonnardel (2006). Respecto a las CCB cromáticas, las únicas estudiadas en el citado trabajo, en la presente investigación existieron diferencias para:

- *Rosa*: en comparación con los TN, tanto los deuteranopes como los protanopes seleccionaron más estímulos como pertenecientes a esta categoría. Este resultado replica el obtenido en la investigación de Bonnardel (2006) con deuteranopes, y además lo generaliza al caso de los daltónicos dicrómatas en general, puesto que los observadores protanopes también mostraron este mismo resultado.
- *Verde*: en comparación con los TN, los deuteranopes seleccionaron más estímulos, resultado también encontrado por Bonnardel (2006). Sin embargo, en esta ocasión los protanopes no mostraron este resultado.

- *Naranja*: el grupo de protanopes seleccionó más estímulos que cualquiera de los otros dos.

Respecto a las CCB acromáticas, no incluidas en la investigación de Bonnardel (2006), existieron diferencias intergrupo significativas tanto para *blanco* como para *gris*: los dos grupos de dicrómatas seleccionaron más estímulos que los TN. Este es un resultado interesante, que puede interpretarse como una extensión de la existencia de una zona neutral en el espectro para los dicrómatas al caso de los colores de superficie: muchos estímulos con un ligero contenido cromático para los TN, pueden carecer del mismo para observadores dicrómatas, lo que incrementaría el uso de los TCB acromáticos. En los resultados recogidos en esta tesis, se ha encontrado que las confusiones más comunes asociadas a los términos acromáticos han sido *blanco-rosa*, *gris-verde*, y *negro-azul*, en ambos tipos de dicrómatas (Tablas 6.13.1 y 6.13.2)⁷.

Se calculó la relación lineal existente entre la frecuencia de uso empírica y la predicha a partir de los modelos A y B (las Tablas 6.32.1 y 6.32.2 indican las frecuencias correspondientes), encontrándose una fuerte relación lineal entre ambas, sobre todo para las predicciones del Modelo B: protanopes, $R^2 = 0,91$ ($F_{(1,9)} = 86,93$, $p < 0,001$), deuteranopes, $R^2 = 0,91$ ($F_{(1,9)} = 91,70$, $p < 0,001$)⁸.

Evidentemente, este resultado es de esperar, puesto que las predicciones del Modelo B son muy acertadas en lo que respecta tanto al número de errores, como a las pruebas de bondad de ajuste (Tabla 6.31). Sin embargo, resulta de gran importancia destacarlo, porque permite derivar la siguiente conclusión: en general, las diferencias encontradas en cuanto a la frecuencia de uso empírica de los distintos TCB, como ocurría con las asimetrías de los errores, son esperables a partir del Modelo colorimétrico B de predicción de errores. En concreto: en comparación con los TN, a partir del Modelo B, se espera una frecuencia de uso mucho mayor para *rosa*, *naranja* y *gris* en protanopes, y para *rosa*, *verde*, *blanco* y *gris* en deuteranopes (es decir, el único desajuste entre las predicciones y los datos se da para *blanco* en protanopes). A pesar de

⁷ El tamaño del efecto asociado a los contrastes efectuados sobre la variable frecuencia de selección, fue en todos los casos grande ($r > 0,50$), o medio-grande ($r \approx 0,40$, obtenido al comparar la frecuencia de selección de blanco en TN con la de P y D).

⁸ Las predicciones del Modelo A, nuevamente, ofrecieron un peor ajuste: protanopes, $R^2 = 0,63$ ($F_{(1,9)} = 15,04$, $p < 0,005$), deuteranopes, $R^2 = 0,67$ ($F_{(1,9)} = 18,17$, $p < 0,005$).

que en trabajos previos, como el de Bonnardel (2006), se encontraran diferencias en la frecuencia de uso, no se ofreció ninguna explicación tan concisa ni tan satisfactoria.

El segundo resultado importante derivado del estudio de la frecuencia de selección, es que no parece una variable relevante de cara a explicar las diferencias individuales encontradas en el grado de acierto con el que se manejan tanto protanopes como deuteranopes a la hora de emplear las CCB. Concretamente: aunque una mayor frecuencia de selección se asoció a un mayor número de aciertos y de errores, no se encontró una relación con el porcentaje de errores (Figuras 6.9-6.11).

Parece claro que la interpretación más plausible es que son las diferencias individuales en sensibilidad (y no en un posible sesgo de respuesta) las que explican la variación en el grado de acierto. A continuación se informa de un resultado que apoya claramente esta interpretación. Se calculó la relación lineal existente entre el incremento en el valor de R^2 (ΔR^2) que aporta el Modelo B sobre el Modelo A (Tabla 6.34), y el porcentaje de errores (véase la Tabla AI.4) para cada observador, encontrándose una sólida relación lineal entre ambas variables, tanto para la combinación de ambos grupos, $R^2 = 0,56$ ($F_{(1,15)} = 19,33$, $p < 0,001$), como para protanopes, $R^2 = 0,78$ ($F_{(1,6)} = 21,68$, $p < 0,005$) y deuteranopes, $R^2 = 0,51$ ($F_{(1,7)} = 7,30$, $p < 0,05$) por separado.

Ya se apuntó en el apartado de resultados, y anteriormente, al hablar de la existencia de diferencias individuales, que los observadores P1: LEL, P7: JJMC, y D7: JP, probablemente se comportasen como auténticos dicrómatas (*true dichromats*) incluso con estímulos cuyo tamaño excede los 2°. Para estos observadores, el Modelo B apenas supuso ninguna mejora en la predicción de las matrices de confusión con respecto al Modelo A. Además, son los que obtuvieron un mayor porcentaje de errores en la tarea de mapa de colores (Tabla 6.19).

De acuerdo con la hipótesis inicial, en el caso de existir diferencias entre protanopes y deuteranopes respecto al **porcentaje de errores** cometidos, estas siguieron el sentido esperado: los **protanopes cometieron más errores que los deuteranopes** (Figura 6.7). Sin embargo, dichas diferencias no se encontraron ni a nivel global, ni para la mayor parte de las categorías. De hecho, el análisis pormenorizado reveló que únicamente en el caso de *naranja* y *azul* (sólo según el criterio laxo para *azul*) los

protanopes cometieron más errores⁹. ¿Qué explicación pueden aportar los modelos de predicción de errores? En relación con este resultado, cabe destacar dos datos importantes:

1. El hecho de que los protanopes cometan más errores que los deuteranopes al utilizar los TCB *naranja* y *azul*, es perfectamente esperable a partir de las predicciones del Modelo B (Tablas 6.29.1-6.29.2): la mayor diferencia favorable a los deuteranopes en cuanto a porcentaje de aciertos (se esperan más errores para los protanopes), se da precisamente para estas dos categorías (junto con *rojo*, lo que también es compatible con los resultados, véase la Figura 6.7).
2. El valor estimado para el parámetro b en la expresión $e^{-b_D \Delta RG_{res, x_{D_i}}}$ resultó ser ligeramente superior en deuteranopes (-12,02) que en protanopes (-9,88) (Tabla 6.28), lo que podría interpretarse como una evidencia a favor de que el aumento en $\Delta RG_{res, x_{D_i}}$ reduce algo más la probabilidad de error en deuteranopes. No obstante, el error típico de las estimaciones es demasiado grande para concluir esto. Evidentemente, en esta diferencia ha podido influir que dos de los ocho observadores protanopes se hayan comportado como verdaderos dicrómatas, mientras que en el grupo de deuteranopes únicamente un observador de los nueve mostró dicho comportamiento. Para comprobar la influencia de este aspecto, se eliminaron los datos de estos observadores y se volvió a estimar el valor del parámetro b , obteniéndose efectivamente un incremento del mismo, tanto en protanopes (-15,49) como en deuteranopes (-12,97) (para los datos agregados se obtuvo un valor de -14,09, frente al de -10,93 obtenido teniendo en cuenta a todos los observadores).

⁹ El tamaño del efecto fue grande en ambos casos (para *naranja*, $r = 0,75$, para *azul* $r = 0,46$)

DISCUSIÓN: TAREA DE MEJORES EJEMPLARES

Como ya se comentó en el con anterioridad (consúltese la Tabla 5.1), algunas investigaciones han empleado únicamente estímulos prototípicos (buenos ejemplares) para estudiar el uso de las CCBs en daltónicos dicrómatas. Una vez analizados los resultados de una tarea equivalente, la de búsqueda de mejores ejemplares, y después de efectuar la comparación con los resultados obtenidos en la tarea de mapa de colores, puede concluirse que en los patrones de resultados de ambas tareas existen puntos comunes, pero también importantes diferencias que merecen ser destacadas, puesto que claramente limitan la extrapolación que puede realizarse a partir de los resultados obtenidos en cualquiera de las tareas mencionadas. En la discusión general trataremos este aspecto con más detalle. Ahora nos centraremos exclusivamente en comentar los resultados derivados de la tarea de búsqueda de mejores ejemplares.

En investigaciones previas que han empleado el método de denominación con estímulos prototípicos se han obtenido resultados dispares, sobre todo para algunas categorías. La Tabla 6.38 pone en relación los resultados obtenidos en la presente investigación con los de los trabajos de Lillo, Davies et al. (2001) y Cole et al. (2006).

Puede observarse cómo para algunas categorías existe un gran acuerdo entre los resultados de diferentes investigaciones. Sin duda, el mayor exponente de esta concordancia es que para *amarillo* no se registró ni un solo error en ningún estudio. Otras categorías como *verde*, *azul* o *blanco* muestran un patrón muy similar entre investigaciones: se cometen muy pocos o errores, o incluso ninguno.

Este hecho toma una relevancia especial si se tiene en cuenta las importantes diferencias existentes entre los distintos trabajos, que pueden consultarse con detalle en los apartados previos (1.4.2.1 y 2.1), y entre las cuales destacan las referentes al método empleado (denominación de color vs. búsqueda de mejores ejemplares) y a las condiciones de observación (tamaño de los estímulos; presentación secuencial vs. simultánea).

Tabla 6.38. Comparación de los resultados obtenidos en tres investigaciones diferentes que han empleado estímulos prototípicos para estudiar el uso de CCBs en daltónicos dicrómatas. Para confeccionar esta tabla se han empleado los datos provenientes de las Tablas 3 y 4 del trabajo de Lillo, Davies et al. (2001), la Figura 8 (parte derecha, referida a daltónicos severos) de Cole et al. (2006), y las Tablas 6.35.1 y 6.35.2 de esta tesis. P: protanopes. D: deuteranopes. Para cada categoría, en caso de disponer de los datos necesarios, se indica la distribución del porcentaje de aciertos y de errores (entre paréntesis). En negrita se señalan aquellos errores detectados en la presente investigación que también han sido detectados previamente. La Tabla 6.38 continúa en la página siguiente.

CCB	Lillo, Davies et al. (2001)		Cole et al. (2006)		Presente investigación	
	P: 83,33%				P: 100%	
Blanco	V:	(8,33%)				
	Am:	(8,33%)				
	D: 88,88%		-		D: 88,89%	
	Am:	(5,55%)				
	Ros:	(5,55%)				Rosa: (11,11%)
Negro	P: 66,66%				P: 100%	
	V:	(16,66%)				
	Mar:	(16,66%)				
	D: 72,22%		-		D: 100%	
	V:	(6,94%)				
	Mar:	(6,94%)				
	Az:	(11,11%)				
Rojo	P: 83,33%		P: 84%		P: 87,5%	
	V:	(16,66%)		V: (2%)		
				Mar: (13%)		Mar: (12,5%)
	D: 94,44%		D: 85%	Mor: (1%)	D: 77,78%	
				V: (1%)		
	Nar: (5,45%)			Mar: (14%)		Mar: (13,33%)
					Nar: (8,89%)	
Verde	P: 91,67%		P: 91%		P: 100%	
	Am:	(8,33%)		Nar: (7%)		
				R: (1%)		
	D: 100%		D: 87%	Mar: (1%)	D: 100%	
				R: (5%)		
				Mar: (5%)		
				Nar: (3%)		
Amarillo	P: 100%		P: 100%		P: 100%	
	D: 100%		D: 100%		D: 100%	
Azul	P: 91,67%		P: 93%		P: 100%	
	Mor:	(8,33%)	Mor:	(7%)		
	D: 94,44%		D: 99%		D: 100%	
	Mor:	(5,45%)	Mor:	(1%)		
Marrón	P: 50%		P: 53%		P: 62,5%	
	N:	(41,66%)		R: (26%)		
				V: (8%)		V: (37,5%)
				Nar: (3%)		
	Mor:	(8,33%)				
	D: 44,44%		D: 73%		D: 100%	
	N:	(27,78%)				
	V:	(22,22%)				
	R:	(5,56%)		R: (15%)		
				V: (11%)		
				Nar: (1%)		

-: Para *blanco* y *negro*, Cole et al. (2006) informaron de la existencia de muy pocos errores (< 1%), y no detallaron su naturaleza. La CCB *rosa* no fue objeto de estudio en la citada investigación.

Tabla 6.38 (Continuación).

CCB	Lillo, Davies et al. (2001)	Cole et al. (2006)	Presente investigación
Rosa	P: 58,33%		P: 75%
	B: (8,33%) R: (8,33%)		V: (10,58%) Az: (0,96%) Mor: (13,46%)
	Az: (8,33%)		
	Gri: (16,66%) D: 94,44%	-	D: 55,56%
	R: (5,56%)		R: (18,52%) Nar: (9,26%) Mor: (1,85%) Gri: (14,81%)
Naranja	P: 75%	P: 73%	P: 87,5%
		R: (4%) V: (15%)	V: (1,04%) Am: (11,46%)
	Am: (25%)	Mar: (6%) Gri: (2%)	
	D: 72,22%	D: 93%	D: 100%
	Am: (27,78%)	R: (1%) V: (4%) Mar: (2%)	
Morado	P: 58,33%	P: 89%	P: 37,50%
	Az: (41,66%)	Az: (8%)	R: (1,89%) Az: (56,82%) Ros: (3,79%)
	D: 55,56%	Gri: (3%)	D: 44,44%
	Az: (38,39%) Mar: (5,56%)	Az: (1%)	N: (1,76%) R: (7,05%) Az: (45,86%) Ros: (0,88%)
Gris	P: 33,33%	P: 93%	P: 62,50%
	V: (33,33%)		V: (34,91%) Az: (2,59%)
	Mar: (8,33%) Ros: (25%)	Mor: (7%)	
	D: 44,44%	D: 99%	D: 88,89%
	V: (33,33%) Mar: (11,1%) Ros: (5,56%) Mor: (5,56%)	Mor: (1%)	Mor: (11,11%)

En el otro extremo se encuentran categorías como *marrón*, *gris* o *morado* en protanopes, que muestran resultados bastante más dispares entre investigaciones. Para facilitar la comparación entre los resultados de las diferentes trabajos, se ha confeccionado la Tabla 6.39, donde se muestra el valor de R^2 de la relación lineal entre la distribución del porcentaje de aciertos y errores obtenido en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares en esta tesis, y las distribuciones equivalentes obtenidas en las otras dos investigaciones comentadas (Lillo, Davies et al., 2001, y Cole et al., 2006).

Tabla 6.39. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la distribución del porcentaje de aciertos y errores de cada CCB, obtenida en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, y las distribuciones obtenidas en investigaciones previas con estímulos prototípicos. Las categorías se han dispuesto en orden descendente dentro de cada grupo de correlaciones, según la magnitud del valor de R^2 . Nota: la ausencia de *rosa* como categoría de respuesta en la investigación de Cole et al. (2006) puede afectar, aunque sea muy poco, a la interpretación de los valores de R^2 correspondientes.

Protanopes				Deuteranopes			
Lillo, Davies et al. (2001)		Cole et al. (2006)		Lillo, Davies et al. (2001)		Cole et al. (2006)	
CCB	R^2	CCB	R^2	CCB	R^2	CCB	R^2
Am	1,00	Am	1,00	Am	1,00	Am	1,00
V	,99	R	1,00	V	1,00	Az	1,00
Az	,99	Az	,99	Az	1,00	Nar	1,00
B	,98	V	,99	B	,99	V	,99
Nar	,96	Nar	,93	R	,97	Gri	,99
R	,93	Gri	,73	N	,95	R	,99
N	,89	Mar	,66	Mor	,93	Mar	,94
Mor	,84	Mor	,31	Ros	,87	Mor	,44
Ros	,81	B	-	Nar	,86	B	-
Gri	,64	N	-	Mar	,58	N	-
Mar	,33	Ros	-	Gri	,57	Ros	-

-: Para *blanco* y *negro*, Cole et al. (2006) informaron de la existencia de muy pocos errores (< 1%), y no detallaron su naturaleza. Necesariamente, los valores de R^2 correspondientes deberían ser muy próximos a 1, debido al elevado porcentaje de aciertos que también se ha obtenido en esta investigación. La CCB *rosa* no fue objeto de estudio en la citada investigación.

Los **dos grupos de dicrómatas** tuvieron un **rendimiento similar** en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares (Figura 6.19), siendo las excepciones más claras *marrón* y *gris*, donde los deuteranopes tuvieron un porcentaje de acierto bastante más elevado, y *rosa*, donde se invirtió este patrón. Sin embargo, ninguna de estas diferencias alcanzó el nivel de significación estadístico. Al comparar la ejecución de los dicrómatas con la del grupo control de **tricrómatas normales**, se observa la siguiente regularidad: **todas las categorías para las que se encontraron diferencias significativas son derivadas**: *marrón*, *rosa*, *morado* y *gris*. De hecho, *naranja* es la única categoría para la que no se encontraron diferencias significativas.

Este patrón de resultados es muy similar el encontrado por Lillo, Davies et al. (2001) con niños dicrómatas, con las siguiente salvedad: en la presente investigación no se encontraron diferencias significativas para *negro* ni para *naranja*, diferencias que sí aparecieron en Lillo, Davies et al. (2001).

Las Figuras 6.20-6.21 son muy útiles para visualizar los resultados de la tarea de búsqueda de mejores ejemplares: en el caso de las categorías primarias (Figuras 6.20A-6.20F y Figuras 6.21A-6.21F) aparecen muy pocos errores (cuadrados sólidos). Sin embargo estos son mucho más frecuentes en el caso de las derivadas (Figuras 6.20G-6.20K y Figuras 6.21G-6.21K).

La aplicación de los Modelos A y B (desarrollados a partir de los datos obtenidos en la tarea de mapa de colores) a los errores cometidos en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares permite establecer (Tablas 6.36.1-6.36.2) que, con la excepción del error cometido para *naranja* por un protanope, su compatibilidad es en todos los casos elevada. No debe olvidarse que dichos **modelos se ajustaron a partir de los datos grupales**, razón por la cual su aplicación al caso concreto de la elección errónea de estímulos concretos como mejores ejemplares por parte de observadores individuales puede considerarse aún más exitosa, a la vez que supone un límite claro a la aplicación de dichos modelos, como recalcaremos detalladamente en la discusión general.

Por último, es necesario destacar que la Figura 6.22 ilustra un resultado importante: la ausencia de relación lineal entre el rendimiento logrado en la tarea de mapa de colores y la tarea de búsqueda de prototipos. Este resultado también será comentado con más detenimiento en la discusión general.

ESTUDIO 1: DISCUSIÓN GENERAL

El primero de los estudios empíricos de esta tesis ha aportado un amplio conocimiento sobre el uso que de los TCBs hacen protanopes y deuteranopes. En comparación con otras investigaciones que han intentado cubrir este mismo objetivo, cabe destacar que en la presente se han cuidado los siguientes aspectos, que creemos de gran importancia:

- 1) Los observadores han realizado **dos tareas experimentales**, una de **mapa de colores** y otra de **localización de mejores ejemplares (foci)**, algo inédito en las investigaciones al uso, en las que lo habitual es ni siquiera hacer hincapié en esta distinción (y centrarse exclusivamente bien en el estudio general de las categorías, bien en el comportamiento exhibido ante estímulos prototípicos: consúltese la Tabla 5.1).
- 2) El **muestreo de los estímulos** se ha llevado a cabo **a partir de los resultados de investigaciones previas** sobre las CCBs en español, efectuadas por el equipo de investigación del cual forma parte el autor de esta tesis (Lillo et al, 2007; pueden consultarse otras referencias en el apartado 2.1). Ello ha permitido, en consonancia con las tareas que debían realizar los observadores, contar con colores focales y buenos ejemplares contrastados empíricamente para cada categoría (y no a partir de la elección sujeta al arbitrio de los investigadores, como por ejemplo en la investigación de Cole et al., 2006). Pero también ha hecho posible incluir estímulos localizados en la frontera entre categorías (consúltese al respecto Boynton y Olson, 1987, 1990), asegurando a su vez la representación de **diferentes niveles tanto de saturación** (Figura 6.2) **como de claridad** en la muestra, sin tener que elevar demasiado el número de estímulos.
- 3) Se ha evaluado el uso de las **once CCBs**, incluyendo tanto las **cromáticas** como las **acromáticas**, en contraposición a otras investigaciones que han estudiado un subconjunto de las mismas (consúltese la Tabla 5.1).
- 4) Los **diferentes tipos de análisis de datos efectuados** aportan una riqueza a la interpretación de los resultados de esta tesis que sería, sin ningún género de dudas, imposible de acumular a partir de una estrategia más reduccionista, utilizando por ejemplo cada uno de ellos por separado.

Ahondando en este último punto, cabe resaltar que los análisis empleados han llegado más lejos de lo que se pretendiera en un principio, trascendiendo el objetivo original de contrastar las hipótesis individuales planteadas en la introducción. A grandes rasgos, los análisis efectuados incluyen una técnica de análisis multivariante como el MDS, diferentes análisis de diferencias de medias (de variables teóricamente relevantes) entre dos o tres grupos de observadores, y la formalización de los denominados Modelos A y B según ha sido explicado con detalle para ver cuál de ellos se ajusta mejor a los datos.

A juicio del autor, la coherencia explicativa sobre el uso de TCBs en protanopes y deuteranopes aportada por los modelos predictivos desarrollados (sobre todo el Modelo B), supone el **pilar más sólido sobre el que descansa uno de los logros más notables de esta tesis**, puesto que, más allá de que las hipótesis planteadas en la introducción se hayan confirmado, los **modelos ofrecen una raíz explicativa común a diferentes hechos empíricos**.

Efectivamente, se ofrece un marco general, asentado sobre conocimientos de carácter psicofísico sobradamente refutados (consúltese el apartado 1.3.1.1) para explicar toda una suerte de fenómenos empíricos registrados tanto a nivel *descriptivo* como *comparativo*. En términos más concretos:

- Por una parte, se han conseguido explicar **hechos empíricos repetidamente contrastados en la literatura especializada**, razón por la cual formaron parte de las hipótesis planteadas en la introducción (y que como recapitularemos en breve han sido replicados en su totalidad). Entre ellos se encuentran los referentes a aspectos tan variados como 1) la elevada frecuencia de selección de estímulos como pertenecientes a determinadas categorías (hipótesis 2), 2) el hecho de que tanto el número (hipótesis 3) como 3) la naturaleza de los errores (hipótesis 4) varíe en función de las distintas categorías, o 4) que los protanopes cometan más errores que los deuteranopes (hipótesis 5).
- En segundo lugar, **fenómenos empíricos puestos de relieve en esta investigación** también pueden ser explicados a partir de los modelos desarrollados. Los dos más importantes son 1) las fuertes asimetrías detectadas para algunos errores (no existía ninguna hipótesis al respecto) y 2) la mejor

ejecución exhibida en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares en comparación con la de mapa de colores (hipótesis 6).

Expresado con otras palabras, y con el objeto de ilustrar la importancia que corresponde al trabajo realizado: tal y como se hacía explícito en la introducción, parecía existir una **laguna** entre el exhaustivo conocimiento científico que sobre el daltonismo se posee a nivel genético o psicofísico, y el escaso conocimiento sobre el uso de TCBs en estos observadores. **La formalización de los Modelos A y B llevada a cabo en esta tesis, ofrece de forma precisa una manera de vincular los conocimientos psicofísicos sobre daltónicos dicrómatas y los datos sobre cómo efectúan la categorización del color.**

Con el objeto de recalcar este hecho, se ha confeccionado la Tabla 6.40. En ella se resumen las hipótesis planteadas en la introducción sobre el uso de los TCBs en daltónicos dicrómatas, y se indican los resultados relacionados con la comprobación de las mismas. Además, en la tercera columna se especifica la manera concreta en la que los Modelos A y B contribuyen a dar cuenta de los resultados obtenidos.

Si se examina con detalle cuáles eran los objetivos específicos del estudio 1, se recordará que se ligaron explícitamente a distintos niveles: descriptivo, comparativo y explicativo. Seguidamente, se formularon diferentes hipótesis relativas a cada uno de estos niveles. A partir de los análisis efectuados gracias a la formalización de los Modelos A y B de predicción de errores, cuya evaluación permite contrastar la hipótesis de que el uso de los TCBs se explica mejor si se postula la existencia de cierta discriminación residual *rojo-verde*, ahora podemos interpretar además que los resultados que confirman las hipótesis formuladas a nivel descriptivo y comparativo son de hecho esperables a partir de la aplicación de los modelos, sobre todo el Modelo B. Es decir: **los resultados son una consecuencia lógica de aplicar los conocimientos sobre visión dicrómata a la categorización de la muestra estimular empleada.**

Tabla 6.40. Resumen de las hipótesis formuladas en la introducción respecto al uso de los TCBs por parte de daltónicos dicrómatas, los resultados que avalan dichas hipótesis, y cómo los Modelos A y B de predicción de errores pueden dar cuenta de dichos resultados. El signo “-” indica que no existía ninguna hipótesis previa en relación con el resultado correspondiente.

Hipótesis formulada	Resultados relacionados	¿Explicación aportada por los Modelos?
1. Se espera que el número de estímulos seleccionados en la tarea de mapa de colores para <i>verde</i> y <i>rosa</i> sea mayor en deuteranopes que en tricrómatas normales (Bonnardel, 2006).	Se confirma la hipótesis, replicando y ampliando los resultados encontrados por Bonnardel (2006).	La frecuencia de selección de estímulos en función de las distintas categorías se ajusta mejor a las predicciones del Modelo B ($R^2 = 0,91$ en protanopes y deuteranopes) que a las del Modelo A ($\Delta R^2 = 0,28$ en protanopes; $\Delta R^2 = 0,24$ en deuteranopes: consúltense la discusión sobre la tarea de mapa de colores).
2. Se espera encontrar conexiones nuevas en dicrómatas. Al menos, las conexiones <i>verde-naranja</i> , <i>verde-marrón</i> y <i>azul-rosa</i> (Montag y Boynton, 1987; Montag, 1994).	Los resultados replican y amplían los resultados encontrados por Montag y Boynton (1987) y Montag (1994).	Tanto el Modelo A (Tablas 6.26.1 y 6.26.2) como el Modelo B (Tablas 6.29.1-6.29.2) predicen errores análogos a las conexiones <i>verde-naranja</i> , <i>verde-marrón</i> y <i>azul-rosa</i> .
3. A nivel cuantitativo, se esperan grandes diferencias en el número de errores cometidos para los distintos TCBs, pero salvo excepciones, no es posible concretar demasiado esta hipótesis.	Los resultados avalan esta hipótesis, como puede observarse en las Tablas 6.24 y 6.25.	El número de errores cometido en función de las distintas categorías se ajusta mucho mejor a las predicciones del Modelo B ($R^2 = 0,79$ en protanopes; $\Delta R^2 = 0,83$ en deuteranopes) que a las del Modelo A ($\Delta R^2 = 0,18$ en protanopes; $\Delta R^2 = 0,24$ en deuteranopes: consúltense la Tabla 6.31).
4. Se espera que la naturaleza de los errores sea diferente en función de la CCB estudiada, pero la facilidad para concretar esta hipótesis depende en gran medida de cuál es la categoría estudiada.	Los resultados avalan esta hipótesis, como puede observarse en las matrices de confusión correspondientes (Tablas 6.13.1-6.13.2 y AI.1.1- AI.1.2)	Las matrices de confusión que resumen la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en función de las distintas categorías se ajusta mejor a las predicciones del Modelo B ($R^2 = 0,93$ en protanopes; $R^2 = 0,97$ en deuteranopes) que a las del Modelo A ($\Delta R^2 = 0,08$ en protanopes; $\Delta R^2 = 0,09$ en deuteranopes consúltense la Tabla 6.31. La Tabla 6.33 muestra el ajuste desglosado por categorías.
5. En caso de existir diferencias significativas entre protanopes y deuteranopes , se espera que los primeros cometan más errores (Nagy y Boynton, 1979; Lillo, Davies et al., 2001).	Los resultados confirman esta hipótesis, aunque no existen diferencias ni a nivel global ni para la mayoría de las categorías. Sólo existen diferencias significativas para <i>naranja</i> y <i>azul</i> (consúltense los análisis que acompañan a la Figura 6.7).	El Modelo B predice que las mayores diferencias favorables a los deuteranopes en relación con el porcentaje aciertos (> 10%) se dan precisamente para <i>azul</i> , <i>naranja</i> y <i>rojo</i> (Tablas 6.29.1-6.29.2). Por el contrario, según el Modelo A, estas diferencias se esperarían para <i>azul</i> , <i>negro</i> y <i>rojo</i> (Tablas 6.26.1 y 6.26.2). El valor estimado para el parámetro <i>b</i> es menor para protanopes (Tabla 6.28).
6. El grado de acierto dependerá del tipo de tarea , de manera que se esperan menos errores para la tarea de prototipos que para la tarea de mapa de colores (Lillo, Vitini et al., 2001; Lillo y Moreira, 2004a).	Los resultados confirman esta hipótesis, como muestran los análisis de medidas repetidas (consúltense la Figura 6.19).	Los errores cometidos en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares muestran una gran compatibilidad a partir de los Modelos A y B (Tablas 6.36.1-6.36.2).
7. El Modelo B de predicción de errores en daltónicos dicrómatas (que incluye discriminación residual <i>rojo-verde</i>) se ajustará mejor a los datos que el Modelo A (que sólo incluye el mecanismo <i>amarillo-azul</i> y la dimensión claridad).	Los resultados indican que efectivamente el Modelo A sobreestima mucho el número de errores. La Figura 6.17 muestra que la distancia a lo largo de las líneas de confusión es una variable relevante relacionada con la probabilidad de error.	El Modelo B se ajusta mejor a los datos que el Modelo A en una amplia gama de variables (Tablas 6.31 y 6.37).
-	Los resultados muestran que para determinados pares de categorías existe una clara asimetría en el grado de los errores cometidos (Tablas 6.17 y AI.3).	Las asimetrías encontradas son esperables tanto a partir del Modelo A como del Modelo B.

En ninguno de los trabajos citados se ofrece un marco explicativo comparable que dé cuenta de hechos empíricos tan variados. Un breve repaso a dos artículos muy actuales sobre la categorización del color, permite consolidar esta afirmación.

Una reciente a la par que interesante línea de investigación sobre modelos evolutivos de la categorización del color, emplea como método la simulación, a partir de datos empíricos sobre la discriminación cromática de distintos tipos de observadores. Concretamente, las investigaciones de Jameson y Komarova (2009a; 2009b) se basan en cómo las limitaciones de la discriminación cromática pueden influir evolutivamente sobre la categorización del color, obviando la reconocida influencia que sobre la misma tienen factores cognitivos de orden superior. Sin embargo, una lectura cuidadosa de dichos trabajos, permite concluir que no ofrecen ningún dato sobre el comportamiento real de estos observadores, y que, por lo tanto, no ayudan a responder a los interrogantes planteados en esta tesis. Expliquemos mejor las razones que llevan a esta afirmación:

- La razón básica es que en estos trabajos se estudia **cómo las limitaciones cromáticas influyen sobre el *proceso evolutivo de categorización del color***, bien en poblaciones homogéneas (el 100% de sus agentes son el resultado de modelar un único fenotipo: tricrómatas normales, protanopes, deuteranopes, etc.) o heterogéneas (formadas por dos o más subpoblaciones homogéneas).
 - A partir de los resultados de las simulaciones, las autoras concluyen que en las poblaciones heterogéneas compuestas por observadores con visión normal del color y otros tipos de observadores con deficiencias cromáticas, como son los dicrómatas, se llega a una solución estable en la categorización del color, que “*minimiza la probabilidad de que colores que pueden confundirse perceptivamente por algunos individuos en una población tiendan a ser clasificados por la toda la población en categorías de color diferentes*” (Jameson y Komarova 2009b, p. 1432) “*...en contraposición a las soluciones evolutivas basadas en la regla de la mayoría o en una notable especialización de la población*” (p. 1434).
 - Pero es un hecho que las 11 CCBs plantean serios problemas a los daltónicos dicrómatas, que utilizan los TCBs asociados con mayor o

menor acierto. Por ejemplo, la confusión *verde-marrón* se da con una frecuencia muy elevada en este tipo de observadores.

- Precisamente porque las confusiones existen y son innegables, en esta tesis partimos del **uso empírico que los daltónicos dicrómatas hacen de los TCBs**. Es decir, intentamos dar cuenta de las matrices de confusión empíricas (Tablas AI.1.1-AI.1-2), a partir de la formalización de dos modelos de predicción de errores, formalización efectuada en dos fases: 1) a partir del uso correcto de los TCBs (los aciertos), 2) se establece qué estímulos son compatibles con el uso de cada TCB y en qué grado, a partir de las limitaciones de la discriminación cromática establecidas según dos modelos diferentes (A y B).
- Las investigaciones de Jameson y Komarova (2009a; 2009b) emplean como muestra de estímulos en sus simulaciones los 85 estímulos del test de ordenación de tonos *FM 100 Hue Test*. Esto supone que únicamente se captan variaciones en tono, evitando variaciones tanto en claridad como en saturación, lo que reduce el alcance de las simulaciones a la **categorización del tono exclusivamente** (Jameson y Komarova, 2009b, p. 1425) (por ejemplo, no hay estímulos acromáticos que representen las CCBs correspondientes).
- Por último, **no se trata en absoluto el problema de los colores focales** (obviamente no es el objeto de los trabajos citados). El énfasis se pone en estudiar dónde se dan las **fronteras entre las categorías** surgidas en los sistemas de categorización de las diferentes simulaciones, de forma que se puedan establecer relaciones de tipo causal entre las limitaciones en la discriminación cromáticas de distintos tipos de observadores y la categorización correspondiente.

En resumidas cuentas, este tipo de trabajos se centran en explorar, mediante técnicas de simulación del proceso evolutivo de categorización del color (tono), cuáles pueden ser los mecanismos que sustentan dicho proceso. Si bien en esta tesis se otorga una importancia radical a las limitaciones cromáticas propias de los daltónicos dicrómatas, sobre las que se sustenta la formalización de los Modelos A y B, el problema objeto de estudio es el uso empírico que hacen estos observadores de los TCBs en el momento presente, sin pretender extraer ninguna conclusión de carácter evolutivo.

Ahora bien, **¿es posible cuantificar hasta qué punto resultan útiles los modelos A y B para explicar el uso de TCBs?** Un examen detallado de la Tabla 6.34 permite concluir aspectos de gran relevancia para evaluar su adecuación:

1. Por una parte, permite comparar la proporción de varianza explicada por ambos modelos. Y puesto que ambos concretan formalmente cómo pueden articularse los conocimientos psicofísicos sobre daltónicos dicrómatas con su uso de los TCBs:

- 1.1. La columna **Modelo A** permite comprobar **en qué grado explican el uso de los TBCs**, para cada observador, los dos mecanismos postulados por los modelos estándar de visión del color en dicrómatas: **el mecanismo amarillo-azul y la dimensión claridad**. Como puede observarse, la proporción de varianza explicada por estos mecanismos varía entre el 55% (P7: JJMC) y el 86% (P1: LEL) en protanopes, y entre el 65% (D9: DSC) y 86% (D6: FJR) en deuteranopes.

- 1.2. La columna **Modelo B** permite comprobar **en qué grado explican el uso de los TBCs**, para cada observador, **el mecanismo amarillo-azul, la dimensión claridad y la discriminación residual rojo-verde** (tal y como aquí ha sido formalizada). La varianza explicada varía entre el 55% (P7: JJMC) y el 92% (P6: JMI y P2: JPGA) en protanopes, y entre el 74% (D9: DSC) y el 96% (D2: ASC) en deuteranopes.

- 1.3. Comparando la proporción de varianza explicada por ambos modelos para cada observador, se puede concretar la proporción de varianza aportada por la inclusión de discriminación residual *rojo-verde* (ΔR^2). Por ejemplo, para algunos observadores el Modelo B aporta una importante proporción de varianza explicada (para P2: JPGA, $\Delta R^2 = 0,19$), mientras que para otros no aporta nada. Por ejemplo, para P1: LEL y P7: JJMC, $\Delta R^2 \approx 0$. Se ha dicho que estos observadores podrían ser verdaderos dicrómatas. Sin embargo, su comportamiento es bien diferente, porque mientras que el de LEL se ajusta muchísimo mejor a las predicciones del Modelo A ($R^2 = 0,86$), el de JJMC se aleja bastante ($R^2 = 0,55$). **¿Qué otros factores pueden estar influyendo en el uso de los TCBs por parte de observadores dicrómatas?** A continuación se barajan algunas posibilidades.

2. De forma complementaria, permite cuantificar la proporción de varianza que no puede ser explicada a partir de los modelos ($1-R^2$). Cabría preguntarse **cuáles son las fuentes de dicha varianza**. Evidentemente, parte será varianza error, y parece plausible pensar que parte se deba a la influencia de otro tipo de factores, entre los cuales pueden encontrarse los siguientes:

2.1. Variaciones individuales en la visión del color. Todos los ajustes que han permitido formalizar los Modelos A y B se han basado en datos existentes en la bibliografía, y que fueron obtenidos promediando los resultados de diferentes observadores. Por supuesto, esto afecta a dos aspectos de vital importancia:

2.1.1. El **diagrama de cromaticidad CIE 1976 $u'v'$** se deriva en definitiva del *Sistema CIE 1931 XYZ*, que es el resultado de la ponderación de las funciones de igualación de varios observadores, y además se sabe que presenta ciertos inconvenientes, sobre todo en la región de longitudes de onda corta (consúltense al respecto el apartado 1.3.1.3, donde se comenta cómo en los trabajos de Stockman, dedicados a la estimación de la sensibilidad espectral de los conos, se prescinde de las funciones CIE de igualación de color, y en su lugar se utilizan, como base de datos colorimétricos, las funciones de igualación de Stiles y Burch, 1959).

2.1.2. Las coordenadas de los **puntos de confusión protanope y deuteranope**. Para resaltar la importancia de este aspecto, basta con mencionar el siguiente hecho: como se comentó en el apartado 1.3.1.2, el genotipo de los deuteranopes contiene un primer gen (y único, en casi la mitad de los casos) en su cromosoma X que codifica cualquiera de los dos polimorfismos del fotopigmento L, $L(\text{ser}^{180})$ o $L(\text{ala}^{180})$. La expresión en la población de estos polimorfismos se estima en un 56% y 44%, respectivamente. Es decir, dar un único punto de confusión deuteranope supone, en cierto modo, simplificar una realidad más compleja (exactamente lo mismo puede decirse respecto a la función de luminosidad de estos observadores: consúltense Stockman y Sharpe, 2000, Figura 10 y p. 1728). Efectivamente, los puntos de confusión derivan de un promedio de diferentes observadores, y de todas las posibilidades que se ofrecen en la literatura especializada, en esta tesis hemos optado por tomar las coordenadas empleadas por Regan, Reffin y Mollon (1994), por las razones cometidas en el apartado 1.3.1.3.

2.2. Factores cognitivos de orden superior. En esta tesis, de forma intencional, no se han tenido en cuenta factores como la memoria del color, la utilidad social asociada a determinados colores, o la saliencia individual de determinados colores. Sin negar ni olvidar la importancia de estos factores, a este respecto estamos completamente de acuerdo con la aseveración de Jameson y Komarova (2009a): “*La omisión de factores cognitivos complejos permite centrarse específicamente en clarificar la influencia de la percepción y la discriminación del color sobre la categorización*” (p. 1416).

Por todo lo comentado en los puntos 2.1 y 2.2, no deja de ser realmente impresionante que el comportamiento exhibido por observadores individuales sea explicado en gran medida por los modelos, y muy especialmente por el Modelo B.

Si se examina el **ajuste de los modelos por categorías**, se encuentra el siguiente patrón general (Tabla 6.31): el Modelo B se ajusta mejor a los datos de la tarea de mapa de colores que el Modelo A, salvo las excepciones reseñadas: *marrón* en protanopes y deuteranopes, y *naranja* y *morado* únicamente en protanopes. Cabe destacar que todas estas excepciones: 1) se dan con CCB derivadas, y 2) en todas ellas el Modelo B sobreestima el porcentaje de aciertos. Como se comentó con detalle anteriormente, la superioridad del Modelo A únicamente es clara en el caso de *morado* en protanopes. De forma análoga como se ha analizado la Tabla 6.34, un examen detallado de la Tabla 6.33 permite evaluar la adecuación de ambos modelos al uso de cada TCB:

1. En primer lugar, permite comparar cómo la articulación del mecanismo *azul-amarillo* y la dimensión claridad, bien aisladamente (Modelo A) o de forma conjunta con la discriminación residual *rojo-verde* (Modelo B), explican el uso de los distintos TCBs:

- 1.1.** El porcentaje de varianza explicada por el **Modelo A** varía entre el 56% (*verde*) y el 99% (*blanco, amarillo y morado*) en protanopes, y entre el 47% (*verde*) y casi el 100% (*blanco*) en deuteranopes.
- 1.2.** El porcentaje de varianza explicada por el **Modelo B** varía entre el 80% (*naranja*) y el 99% (*blanco, negro, rojo y amarillo*) en protanopes, y entre el 84% (*gris*) y prácticamente el 100% (*blanco, naranja, y azul*) en deuteranopes.

- 1.3. El incremento aportado por la inclusión de discriminación *rojo-verde* residual es ostensible para explicar el uso de algunos TCBs como *verde* ($\Delta R^2 = 0,40$ en protanopes y $\Delta R^2 = 0,49$ en deuteranopes), y apenas aporta nada nuevo para explicar el uso de otros, como *blanco* y *amarillo* ($\Delta R^2 \approx 0$), lo cual es totalmente lógico si se tienen en cuenta las características de la localización colorimétrica de las CCBs en los colores de superficie (consúltese también la Tabla 6.30.3) (como ya se ha comentado, únicamente para morado en *protanopes* se reduce la proporción de varianza explicada, $\Delta R^2 = -0,06$).
2. Como posibles factores relacionados con las **fuentes de la varianza que queda por explicar** (aparte de la debida al error) en el uso de los distintos TCBs, cabría destacar los dos siguientes:
- 2.1.1. *El muestreo de los estímulos.* La representatividad de las distintas CCBs en el conjunto de estímulos empleados puede no ser la más idónea. Puesto que de ella depende que los polinomios ajustados en la expresión $a_{x_{D_i}} = f(L^*_{x_{D_i}})f(s_{x_{D_i}})$ sea realmente útil de cara a la predicción de errores, esta última se verá afectada negativamente por una mala representación de las CCBs. En este sentido, es destacable que el comparativamente bajo ajuste conseguido por el Modelo B para *naranja* en protanopes ($R^2 = 0,80$) se debe fundamentalmente a la omisión del error *naranja-amarillo* (consúltese las Tablas 6.36.1-6.36.2: algo parecido ocurre con *morado*).
- 2.1.2. *La existencia de diferencias individuales en el uso de TCBs.* Evidentemente, la experiencia personal y las presiones lingüísticas experimentadas por cada individuo en el uso de los TCBs, entre otros factores, puede determinar un uso diferencial de los mismos. En el apartado de resultados “II. Frecuencia y distribución de los errores” se presentaron algunas matrices de confusión individuales con el porcentaje de aciertos y la distribución del porcentaje de errores cometidos por algunos observadores. Examinando el **ajuste de las predicciones de los modelos A y B a las matrices individuales para cada TCB**, es decir, creando una tabla similar a la Tabla 6.33, pero para cada observador (que no se muestran), se extrajeron varios resultados importantes, de los cuales destacaremos los dos siguientes, porque ilustran perfectamente cómo existe una amplia variabilidad individual en el uso de TCBs:

- El porcentaje de varianza explicada por el Modelo B para *naranja* en protanopes, varía entre el 49% (P7: JJMC; consúltase la Tabla AI.5.2) y el 99% (P6: JMI; consúltase la Tabla AI.5.1). Mientras que P7 tuvo un 40% de aciertos en *naranja*, y cometió un 39,23% de errores con *amarillo*, 14,62% con *marrón*, y 6,15 con *verde*, P6 obtuvo un 85,71% de aciertos, y un 14,29% de errores con *marrón*, ajustándose mucho más a las predicciones del Modelo B (Tabla 6.29.1).
- En el caso de *morado* en protanopes, el porcentaje de varianza explicada por el Modelo B varía entre el 0% (P7: JJMC; consúltase la Tabla AI.5.2) y prácticamente el 100% (P6: JMI; consúltase la Tabla AI.5.1). Mientras que P7 tuvo un 0% de aciertos en *morado*, cometiendo un 97,622% de errores con *azul*, P6 obtuvo un 88,89% de aciertos, y un 11,1% de errores con *azul*, ajustándose por completo a las predicciones del Modelo B (Tabla 6.29.1).

Examinaremos ahora con cierto detalle el comportamiento exhibido al emplear el TCB *morado*. Curiosamente, esta es la única categoría para la que tanto protanopes como deuteranopes mostraron significativamente más errores en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares que los tricrómatas normales (consúltase la Figura 6.19). Y lo que es aún más llamativo: es la única categoría para la que se registró, tanto en protanopes como en deuteranopes, un porcentaje de acierto menor en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares (Ps: 37,5%; Ds = 44,44%) que en la de mapa de colores (Ps: 56,06%; Ds: 57,97%). De hecho, se trata de la única categoría para la que dos observadores, un protanope (P7) y otro deuteranope (D9), obtuvieron un 0% de aciertos en la tarea de mapa de colores (Tablas 6.15.1-6.15.2), habiendo seleccionado tres y un único estímulos “*azules*” (conforme a los TN), respectivamente, cada uno de ellos. En ambos se replicó este mismo resultado (selección de un estímulo “*azul*”) en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares (Tablas 6.36.1-6.36.2). Tanto en protanopes como en deuteranopes, *morado* mostró una mayor variabilidad tanto en su ejecución como en su adecuación a las predicciones del Modelo B en la tarea de mapa de colores. Es decir, sin duda el uso de este TCB es el más idiosincrásico. Es más, en varias ocasiones, durante las sesiones experimentales, algunos daltónicos dicrómatas hicieron espontáneamente el comentario “*es que yo no sé lo que es el morado*”. Este conjunto de hechos bien merece realizar una importante reflexión.

Tal y como se comentó en el apartado 1.4.2.1 de la parte teórica de esta tesis, existen resultados contradictorios referentes a si los observadores protanopes emplean (Wachtler, Dohrmann y Hertel, 2004) o no (Bimler y Paramei, 2005, Paramei, Bimler y Cavonius, 1998) el término *rojo* junto con el término *azul* para describir la apariencia de las longitudes de onda corta del espectro visible. Y ya se resaltó que este detalle es vital de cara al estudio de los mecanismos cromáticos así como para postular la existencia de sensaciones de tipo *rojo-verde* en este tipo de observadores. De forma análoga, esta claro que, con estímulos de superficie, el uso de *morado* resulta muy problemático para aproximadamente la mitad de los observadores, tanto protanopes como deuteranopes, y en las dos tareas planteadas, aunque hay base suficiente para postular que las razones pueden ser diferentes para cada tipo de dicrómata:

- Para protanopes, tanto el Modelo A como el B predicen que los errores al buscar *morados* se concentrarán en *azul*, y esto es exactamente lo que ocurre (Tabla 6.13.1). No obstante, en términos cuantitativos, el Modelo A ofrece un mejor ajuste (Tabla 6.33). El mismo patrón se da en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares (Figura 6.20J y Tabla 6.35.1). Parece que, concretamente para este TCB, el Modelo A ofrece predicciones más afines a los datos, aunque para algunos observadores (como P6: JMI) sin duda el Modelo B ofrece un mayor ajuste.
- Para deuteranopes, las categorías con las que se predicen confusiones son mucho más variadas: *gris*, *verde*, *marrón*, *negro* y *azul* (la línea de confusión que pasa por el punto acromático atraviesa la línea de los morados, de ahí las predicciones con las categorías acromáticas). Sin embargo, a nivel empírico apenas se registran errores con *gris*, aunque sí con *negro* y *verde*, y aparecieron errores con *rojo* y *naranja* (Tabla 6.13.2; aunque este último error lo cometió únicamente un observador: Tabla 6.15.1). El porcentaje de errores con *azul* fue mayor del esperable, y en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, los errores se concentraron casi exclusivamente en *azul*, y en menor medida en *rojo* (Figura 6.21J y Tabla 6.35.2).

Es decir, parece que hay una tendencia a confundir *morado* con *azul* en mayor medida de lo que se esperaría a partir del Modelo B en protanopes, y de ambos modelos

en deuteranopes, tendencia que se ve aún más exagerada en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, lo cual resulta sorprendente sobre todo para deuteranopes.

Parece claro pues que el estudio del uso de *morado* en daltónicos dicrómatas, tanto en estímulos monocromáticos como en colores de superficie, merece especial atención, y debería ser objeto de investigaciones futuras.

En la investigación llevada a cabo por Lillo et al. (2001) se obtuvo un importante resultado: la denominación de estímulos prototípicos de las CCBs era mucho menos errónea de lo que podría esperarse en principio, a partir de la extrapolación directa de los resultados obtenidos en condiciones de laboratorio con estímulos de apertura de pequeño tamaño. En la tarea de búsqueda de mejores ejemplares empleada en la presente investigación, los análisis comparativos entre los resultados obtenidos por daltónicos dicrómatas y controles arrojó los siguientes resultados: en comparación con los tricrómatas normales, los protanopes exhibieron un rendimiento significativamente peor para *marrón*, *morado* y *gris*, y los deuteranopes, para *rosa* y *morado*, no existiendo diferencias significativas entre ambos tipos de dicrómata.

El hecho de que Lillo, Davies et al. (2001) encontraran un rendimiento significativamente menor en niños dicrómatas que en el grupo control para *negro* (nombrado *verde* y *marrón* por protanopes y deuteranopes, y además *azul* por estos últimos) y *naranja* (nombrado *amarillo* por un 25% de los observadores) y que estos resultados **no se hayan replicado en este estudio**, puede ser un indicio del efecto del aprendizaje del uso de estos términos. El trabajo de Cole et al. (2006) asimismo informa de muy pocos errores para *negro*, y para *naranja* en el caso de los deuteranopes, aunque los protanopes sí que cometieron más errores al nombrar el estímulo que pertenecía nominalmente a esta categoría (27%).

Las Tablas 6.38 y 6.39 muestran el grado de **concordancia entre los resultados obtenidos para las distintas categorías en diferentes investigaciones**. Cabe destacar que la concordancia es **mucho mayor para las categorías primarias** que para las derivadas. Efectivamente: 1) Para *amarillo* no se registró absolutamente ningún error en ninguna investigación. 2) *Verde*, *azul* y *blanco* mostraron muy pocos errores. 3) La falta de concordancia con *negro*, proviene exclusivamente de los abundantes errores registrados en la investigación de Lillo, Davies et al. (2001), realizada con niños. 4) De

forma similar, la mayor falta de concordancia con *rojo* se debe a la confusión con *verde* (16,66%) reseñada en Lillo, Davies et al. (2001), error que parece desaparecer en dicrómatas adultos.

Ya se comentó anteriormente que si se comparan los patrones de resultados obtenidos en las dos tareas, se observan puntos comunes, pero también peculiaridades e importantes diferencias que sin duda limitan la validez de una posible extrapolación de los resultados obtenidos en una única tarea. Destacaremos los siguientes aspectos:

1. *Porcentaje de aciertos*. En términos globales, el porcentaje de aciertos fue superior en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares que en la tarea de mapa de colores, tanto para protanopes como para deuteranopes. Para algunas categorías como *verde*, la diferencia es abismal. Como ya se ha comentado, *morado* es la clara excepción a este patrón.
2. *Naturaleza de los errores*. En términos generales, los errores cometidos al buscar los mejores ejemplares son coherentes con los cometidos en la tarea de mapa de colores. Así mismo, también lo son con los errores predichos por los Modelos A y B, y para la gran mayoría de los errores cometidos, las categorías correspondientes están fuertemente conectadas (Tablas 6.2.2-6.2.3).
3. *Categorías primarias vs. derivadas*. Si se calculan los promedios de los porcentajes de acierto de los distintos TCBs atendiendo a la distinción entre CCBs primarias (*blanco, negro, rojo, verde, amarillo y azul*) y derivadas (*marrón, rosa, naranja, morado y gris*), es evidente que la superioridad de las primarias es muchísimo mayor en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares que en la tarea de mapa de colores:
 - Protanopes. Tarea mapa de colores: 65,73% (primarias) vs. 52,76% (derivadas). Tarea de búsqueda de mejores ejemplares: 97,92% (primarias) vs. 65,00% (derivadas).
 - Deuteranopes: Tarea mapa de colores: 69,04% (primarias) vs. 56,72% (derivadas). Tarea de búsqueda de mejores ejemplares: 94,44% (primarias) vs. 77,78% (derivadas).
 - Sin excepción, todas las diferencias significativas encontradas entre el rendimiento obtenido por tricrómatas normales y daltónicos dicrómatas en la

tarea de búsqueda de mejores ejemplares se dieron con categorías derivadas: *marrón, rosa, morado y gris*.

4. *Falta de correlación entre el rendimiento de las dos tareas:* La Figura 6.22 muestra la ausencia de correlación entre el rendimiento obtenido en la tarea de mapa de colores y el conseguido en la tarea de búsqueda de prototipos. Con la salvedad de que el rendimiento de los dos observadores protanopes clasificados como verdaderos dicrómatas fue comparativamente bajo en ambas tareas, parece que la especificidad estimular de los colores focales disminuye la probabilidad de error en esta tarea, entendiendo por especificidad estimular que la discriminabilidad entre ellos está bien garantizada a partir de la actividad del mecanismo *amarillo-azul* y la dimensión claridad. Comentemos este aspecto con más detalle:

- Una de las conclusiones del estudio de las CCBs, es que los centroides de dichas categorías nunca pueden estar representados en un mismo nivel de claridad (consúltese Kaiser y Boynton, 1996, capítulo 11). Algo similar ocurre con los colores focales (véase el apartado 2.2.1). Como ya se ha comentado, el resultado de que tanto protanopes como deuteranopes tengan un rendimiento superior al esperado al trabajar con estímulos prototípicos, no es nuevo. Pero sí resulta llamativo que, dadas las características de la presente investigación, dicho resultado se haya mantenido de forma inexorable. Efectivamente, en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, como en la de mapa de colores, la presentación de los estímulos fue simultánea. Es decir, que los observadores buscaban el mejor ejemplar de cada categoría visualizando todos los estímulos, incluidos aquellos con alta compatibilidad (similares al prototipo), algo muy diferente a lo que ocurrió en las otras investigaciones citadas: Lillo, Davies et al. (2001) presentaron los estímulos de forma secuencial, y Cole et al. (2006) de forma simultánea, pero trabajando únicamente con 10 estímulos (supuestamente) prototípicos, posibilitando que los observadores siguieran una estrategia de eliminación (es decir, nombrando primero aquellos estímulos ante los cuales estaban más seguros, como por ejemplo *amarillo, blanco o negro*).
- ¿Qué explicación pueden aportar los modelos de predicción de errores? Los **estímulos altamente compatibles** son un **subconjunto muy reducido** de todos los estímulos compatibles, por lo que, tanto el Modelo A como el

Modelo B, predicen un rendimiento muy superior en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, puesto que es de esperar que en ella los observadores busquen estímulos de máxima compatibilidad con la categoría indicada por el experimentador.

La comparación de los resultados de ambas tareas permite llegar a la siguiente conclusión: el **tamaño estimular** empleado (4°) facilita la aparición de **discriminación residual rojo-verde** en el desempeño de los daltónicos dicrómatas. Por eso, en la tarea de mapa de colores, el **Modelo B se ajusta mucho mejor a los datos**. Por otra parte, parece que la tarea de mapa de colores es mucho más sensible que la de búsqueda de mejores ejemplares de cara a detectar diferencias en el grado de discriminación *rojo-verde* residual. **A partir de los resultados obtenidos al buscar mejores ejemplares, no puede inferirse cómo se comportará un observador en la tarea de mapa de colores.**

2.3. CAPÍTULO 7: ESTUDIO 2. USO DE TÉRMINOS DE COLOR BÁSICOS EN PERSONAS DE EDAD AVANZADA

Con el objeto de estudiar el uso que hacen las personas mayores de los TCB, se llevó a cabo un estudio paralelo al descrito en daltónicos dicrómatas. Como ya se ha mencionado, el objetivo básico de este estudio es comprobar hasta qué punto existe compensación del sistema visual para paliar los cambios fisiológicos asociados a la edad.

MÉTODO

Participantes

Todos los participantes de edad avanzada fueron examinados en residencias o centros de día de la tercera edad. A raíz de los resultados obtenidos en los tests convencionales de visión del color (los mismos que en el Estudio 1), se excluyeron todos los participantes que hubieran cometido errores de tipo protán o deután. A continuación, se confeccionaron dos grupos, de 15 observadores cada uno. El primero, estaba formado por observadores mayores que pasaron todos los tests sin cometer errores. El segundo, por observadores que cometieron algún error de tipo tritán. La Tabla 7.1 muestra información sobre ambos grupos. El grupo control fue el mismo que en el caso del Estudio 1.

Dentro del grupo de observadores mayores que pasaron los tests, hubo ocho observadores afáquicos (operados de cataratas), mientras que en el grupo de observadores con defectos tritá, hubo únicamente dos (véase a continuación).

Tabla 7.1. Observadores que tomaron parte en el Estudio 2. Para cada grupo se muestra el número de participantes, así como el rango de edad, la edad media (y la desviación típica) en años.

Grupo		N (hombres, mujeres)	Rango de edad	Edad media (desviación típica)
Control		15 (6, 9)	[19 - 24]	21,40 (1,85)
Mayores	Pasaron los tests	15 (3, 12)	[71 - 87]	80,33 (4,41)
	Con defectos tritán	15 (2, 13)	[74 - 98]	86,47 (6,83)

Materiales, estímulos e instrumentos

El material estimular fue el mismo que se ha descrito en el Estudio 1. Además, se empleó un CRT convenientemente calibrado, conectado a un PC en el que estaba instalada la versión temporal de AMLA (Lillo y Moreira, 2005), una técnica inspirada en la fotometría heterocromática de fluctuación, con el objetivo de evaluar el efecto del amarillamiento del cristalino sobre la función de eficiencia espectral. Los datos obtenidos no serán objeto de análisis en la presente tesis: únicamente son relevantes aquí porque sirvieron para confirmar las afirmaciones verbales de los participantes de edad avanzada acerca de si habían sido o no operados de cataratas.

Los ajustes efectuados durante la aplicación de la técnica, mostraron desviaciones sistemáticas en el sentido esperado a partir de las afirmaciones verbales de los participantes.

La diferencia fundamental con las evaluaciones efectuadas en el Estudio 1 fue la falta de un control minucioso sobre la iluminación bajo la que se efectuaron las pruebas, debido a que eran los experimentadores los que debían desplazarse para evaluar a los participantes en las residencias y los centros de día de la tercera edad.

Procedimiento

El procedimiento fue exactamente el mismo que el descrito en el Estudio 1, con la salvedad de que en esta ocasión hubo que hacer algunos descansos cuando los participantes manifestaban su cansancio.

RESULTADOS: TAREA DE MAPA DE COLORES

Como en el Estudio 1, los resultados se presentarán en tres bloques: I. Conexiones entre categorías, II. Frecuencia y distribución de los errores, y III. Análisis colorimétrico de los errores.

I. Conexiones entre categorías

Para estudiar las conexiones existentes entre CCBs, se aplicó exactamente el mismo procedimiento descrito en el apartado 2.2 para tricrómatas normales jóvenes, protanopes y deuteranopes: se consideró que existía una conexión entre dos categorías siempre que un mismo estímulo hubiera sido seleccionado como perteneciente a ambas, y la fuerza de dicha conexión se determinó a partir de tres estrategias diferentes. Los resultados obtenidos se muestran en las Tablas 7.2.1-7.2.2 (estrategia A), 7.3.1-7.3.2 (B) y 7.4.1 -7.4.2 (C).

La Tabla 7.5, muestra, por encima de la diagonal, las conexiones existentes en el grupo de mayores que pasaron los tests, y que no se dieron en tricrómatas normales jóvenes. Se detectaron conexiones entre *rojo y marrón*, *rojo y gris*, *verde y marrón*, *verde y rosa*, *verde y morado*, y *marrón y rosa*. Como puede apreciarse, en todos y cada uno de estos casos, fue únicamente un observador el que mostró realmente la conexión. Por debajo de la diagonal, la Tabla 7.5 muestra las conexiones existentes en mayores con defectos tritán que no se dieron en tricrómatas normales jóvenes: 8 mostraron alguna conexión entre *marrón y morado*, 5 entre *amarillo y naranja*, 2 entre *verde y naranja*, y 1 entre *rojo y marrón*, *verde y morado*, *azul y marrón*, *azul y naranja*, *rosa y gris*. Por lo tanto, las conexiones *amarillo-naranja*, *verde-naranja* y *azul-naranja* aparecieron exclusivamente en el grupo de observadores con defectos tritán (en la Tabla 7.5 se señalan mediante un asterisco).

Las matrices mostradas en las Tablas 7.2.1-7.2.2, 7.3.1-7.3.2 y 7.4.1-7.4.2 se emplearon como matrices de similaridad sobre las cuales se aplicaron diferentes análisis de MDS **no métrico** forzando una solución de **tres dimensiones** (consúltese el apartado 2.2 para ver los demás detalles del tipo de análisis efectuado). La Tabla 7.6 muestra los valores del stress bruto normalizado para las distintas soluciones, según el grupo de observadores y la estrategia empleada para calcular la fuerza de las conexiones. Como puede verse, el ajuste de las soluciones fue muy bueno en todos los casos (valores menores de 0,05 en todos los casos), muy especialmente, como es obvio, para las soluciones tridimensionales.

Tabla 7.2.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores que pasaron los tests, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	83,52				5,49	3,30		5,49			2,20
N		75,04		5,41		4,10	9,33			0,82	5,30
R			69,17	0,80		0,80	2,41	11,50	6,81	7,70	0,80
V		3,80	0,58	78,67	4,03	4,03	2,14	0,58		1,15	5,02
Am	5,32			7,45	85,11						2,13
Az	3,03	5,05	1,01	7,07		68,69	1,01	2,02		6,06	6,06
Mar		5,96	1,57	1,95		0,52	81,90	1,05	1,05	1,57	4,43
Ros	3,76		10,77	0,75		1,51	1,51	58,13	3,56	19,26	0,75
Nar			9,62				2,27	5,36	80,72	2,03	
Mor		0,59	5,62	1,17		3,52	1,76	15,00	1,05	69,54	1,76
Gri	1,39	4,49	0,69	6,05	1,39	4,16	5,87	0,69		2,08	73,18

Tabla 7.2.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores con defectos tritán, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia A, a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 7.2.1 pero para mayores con defectos tritán.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	84,40				2,75		0,93	5,55		1,87	4,50
N		53,64		4,50	0,35	7,85	15,25			11,72	6,70
R			56,68		1,32		4,02	14,37	12,63	10,28	0,70
V		4,69		58,88	4,18	14,75	3,82		1,96	4,16	7,57
Am	2,33	0,57	1,49	6,54	65,17	4,26	3,17	3,07	8,64		4,75
Az		9,09		16,41	3,03	47,71	7,16	0,56	0,56	7,44	8,04
Mar	0,28	8,92	1,63	2,15	1,14	3,62	52,67	1,35	1,05	17,34	9,85
Ros	4,00		13,84		2,62	0,67	3,20	49,74	12,73	11,88	1,31
Nar			13,69	2,94	8,27	0,76	2,80	14,32	53,71	3,51	
Mor	0,69	8,33	5,07	2,84		4,57	21,08	6,09	1,60	39,43	10,30
Gri	1,89	5,41	0,39	5,87	2,35	5,61	13,60	0,76		11,71	52,40

La solución tridimensional obtenida a partir de la aplicación del MDS para el grupo de observadores **mayores que pasaron los tests** (Estrategia A) se representa en la Figura 7.1 en 3D (Figura 7.1A) y mediante los planos formados por las distintas dimensiones obtenidas en la solución (Figuras 7.1B-D) (la Tabla 7.7 muestra las coordenadas correspondientes). Cabe destacar las dos características siguientes:

1. Las soluciones tridimensionales ofrecen un patrón claramente interpretable en términos de las **tres dimensiones clásicas, dos cromáticas y una acromática** (Figura 7.1). Ese resultado es idéntico al obtenido a partir de los datos de tricrómatas normales jóvenes (Figura 6.4).

Tabla 7.3.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores que pasaron los tests, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B, a los resultados de la tarea de mapa de colores.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	100				6,25	4,41		6,48			1,90
N		100		4,83		7,35	7,28			0,84	6,13
R			100	0,73		1,47	1,92	18,53	11,91	8,08	0,95
V		7,21	1,16	100	8,75	10,29	2,38	1,30		1,69	8,26
Am	6,58			5,12	100						1,90
Az	3,95	5,46	1,16	5,12		100	0,64	2,59		5,06	5,69
Mar		12,43	3,49	2,72		1,47	100	2,59	2,81	2,53	8,03
Ros	6,58		16,62	0,73		2,94	1,28	100	6,64	21,57	0,95
Nar			9,85				1,28	6,12	100	1,51	
Mor		1,09	11,13	1,46		8,82	1,92	33,13	2,51	100	2,84
Gri	2,63	7,06	1,16	6,38	2,50	8,82	5,41	1,30		2,53	100

Tabla 7.3.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores con defectos tritán, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia B, a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 7.3.1 pero para mayores con defectos tritán.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	100				3,57		0,54	8,05		1,75	3,60
N		100		7,96	0,87	19,05	16,94			21,13	10,32
R			100		2,29		3,10	27,83	25,49	12,86	0,75
V		8,39		100	10,04	34,40	4,08		5,48	7,21	11,21
Am	3,25	0,65	2,32	7,10	100	6,34	2,16	5,26	15,40		4,49
Az		14,64		25,06	6,54	100	6,87	1,36	1,41	11,59	10,71
Mar	1,11	28,42	7,10	6,49	4,86	15,01	100	6,44	5,20	53,45	25,96
Ros	6,57		25,35		4,72	1,18	2,56	100	26,66	15,44	1,45
Nar			22,29	3,33	13,26	1,18	1,99	25,60	100	4,05	
Mor	2,21	21,84	18,13	7,06		15,60	32,93	23,89	6,53	100	22,34
Gri	5,33	12,48	1,23	12,85	7,29	16,86	18,71	2,63		26,13	100

- Sin embargo, aparece una **diferencia sustancial** con respecto a la solución obtenida para TN jóvenes (Figura 6.4): **el orden en el que emergen las dimensiones es diferente**. Para ambos grupos, la primera dimensión resulta compatible con el funcionamiento del mecanismo *rojo-verde*. Sin embargo, el orden de las otras dos dimensiones se invierte: la *claridad* aparece como la segunda dimensión en los análisis efectuados sobre los mayores que pasaron los tests, relegando al mecanismo *amarillo-azul* a la tercera dimensión.

La Tabla 7.8 muestra las correlaciones obtenidas entre las dimensiones derivadas de los análisis MDS efectuados sobre los datos de TN jóvenes (Tabla 6.9) y observadores mayores que pasaron los tests (Tabla 7.7): nótese que la correlación más alta aparece entre la primera dimensión obtenida en la solución de los TN jóvenes y la primera dimensión de los mayores que pasaron los tests, alcanzando un valor igual a 0,95.

Tabla 7.4.1. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores que pasaron los tests, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C, a los resultados de la tarea de mapa de colores.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	15	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1
N		15	0	4	0	1	7	0	0	0	2
R			15	0	0	0	1	6	3	4	1
V				15	2	2	1	1	0	1	2
Am					15	0	0	0	0	0	0
Az						15	0	0	0	2	1
Mar							15	1	0	0	0
Ros								15	2	6	0
Nar									15	0	0
Mor										15	1
Gri											15

Tabla 7.4.2. Conexiones existentes entre CCB en observadores mayores con defectos tritán, y fuerza de dichas conexiones, derivada de aplicar la Estrategia C, a los resultados de la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 7.4.1 pero para mayores con defectos tritán.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	15	0	0	0	1	0	0	1	0	0	2
N		15	0	4	0	5	7	0	0	4	2
R			15	0	0	0	1	6	4	3	0
V				15	3	9	0	0	2	1	5
Am					15	0	0	0	5	0	0
Az						15	1	0	1	3	1
Mar							15	0	1	8	5
Ros								15	4	4	1
Nar									15	1	0
Mor										15	3
Gri											15

La segunda dimensión de los TN jóvenes (etiquetada como *amarillo-azul*) correlaciona 0,77 con la tercera de los mayores que pasaron los tests, y la tercera dimensión de los TN jóvenes (etiquetada como *claridad*) correlaciona -0,79 (recuérdese que lo importante es el valor absoluto de la correlación, no el signo) con la segunda de los mayores que pasaron los tests. Como se detallará en la discusión, parece claro que a la hora de emplear los TCBs, la **claridad gana importancia con la edad**, y se utiliza como una fuente de información incluso más relevante que el mecanismo *amarillo-azul*. Este resultado se mantiene en las soluciones obtenidas al aplicar el MDS a las matrices grupales obtenidas mediante las otras estrategias, si bien las soluciones obtenidas a partir de las estrategias A y B son mucho más parecidas que la obtenida a partir de la estrategia C (la Tabla 7.9 muestra las correlaciones calculadas entre las dimensiones obtenidas en las distintas soluciones).

Tabla 7.5. Conexiones entre CCB existentes en observadores mayores que no se dieron en tricrómatas normales jóvenes. Por encima de la diagonal se muestran las conexiones nuevas mostradas por el grupo de observadores mayores que pasaron los tests (a partir las Tablas 6.2.1, 7.2.1 y 7.4.1). Por debajo de la diagonal, las existentes en observadores mayores con defectos tritán (a partir de las Tablas 6.2.1, 7.2.2, y 7.4.2). Cada celda indica el número de observadores que mostró conexiones que no se dieron en el grupo de tricrómatas normales jóvenes. Los ceros muestran por tanto conexiones que sólo se dieron en la matriz grupal, pero que no se dieron en ningún observador individual.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	-										
N		-									
R			-	0		0	1				1
V				-			1	1		1	
Am		0	0		-						0
Az					0	-	0	0			
Mar	0		1	0		1	-	1		0	
Ros					0	0	0	-			0
Nar				2*	5*	1*			-	0	
Mor	0			1			8		1	-	
Gri			0		0			1			-

*: conexiones detectadas en observadores mayores con defectos tritán que no se dieron en los observadores mayores que pasaron los tests.

Tabla 7.6. Stress bruto normalizado obtenido en las soluciones de diferentes análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de los observadores mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán, mostradas en las Tablas 7.2.1-7.2.2 (Estrategia A), 7.3.1-7.3.2 (Estrategia B) y 7.4.1-7.4.2 (Estrategia C). TN: tricrómatas normales. Todas las soluciones para las que se da el valor del stress bruto normalizado son tridimensionales, a excepción del caso de los mayores con defectos tritán, para los que se da el valor de las soluciones tridimensional (entre paréntesis) y bidimensional

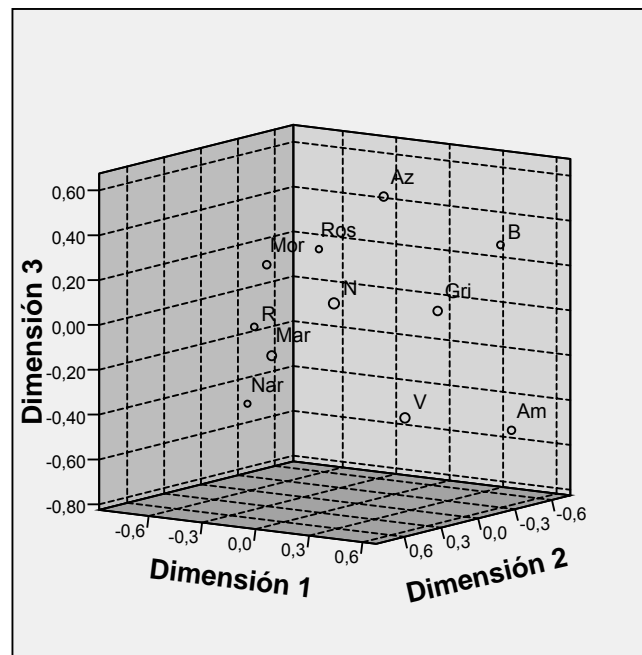
Estrategia	TN jóvenes	Mayores que pasaron los tests	Mayores con defectos tritán
A	,01173	,00717	(,00249); ,02148
B	,01181	,00731	(,00286); ,02783
C	,01505	,01782	(,00796); ,04218

Pasemos ahora a comentar los resultados obtenidos al aplicar los análisis MDS al grupo de **observadores mayores con defectos tritán**. Al contrario de lo que sucede con los mayores que pasaron los tests, las soluciones tridimensionales no ofrecen un patrón tan nítidamente interpretable. Por una parte, la tercera dimensión es muy difícil de interpretar: *blanco* se sitúa en un extremo, y *verde*, *azul*, *naranja* y *rojo* en el otro. Además, respecto a las dos primeras dimensiones, mientras se encuentran indicios claros de la actividad del mecanismo *rojo-verde*, la segunda dimensión no ofrece un patrón claro, puesto que organiza las categorías de forma interpretable en parte en términos de la claridad, y en parte en términos del mecanismo *amarillo-azul*.

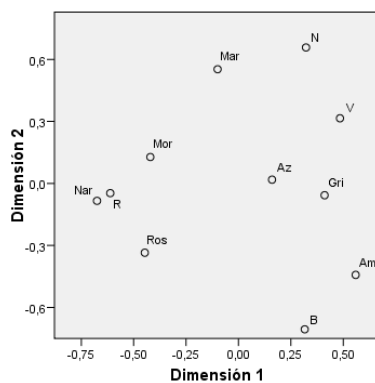
Tabla 7.7. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en la solución tridimensional del análisis MDS no métrico aplicado a la matriz grupal de observadores mayores que pasaron los tests, mostrada en la Tabla 7.2.1 (Estrategia A). D1: dimensión 1, D2: dimensión 2, D3: dimensión 3.

	D1	D2	D3
B	,316	-,706	,262
N	,322	,658	,189
R	-,612	-,047	-,103
V	,484	,315	-,352
Am	,559	-,443	-,504
Az	,160	,018	,562
Mar	-,100	,553	-,100
Ros	-,447	-,335	,220
Nar	-,675	-,084	-,457
Mor	-,421	,128	,217
Gri	,411	-,057	,066

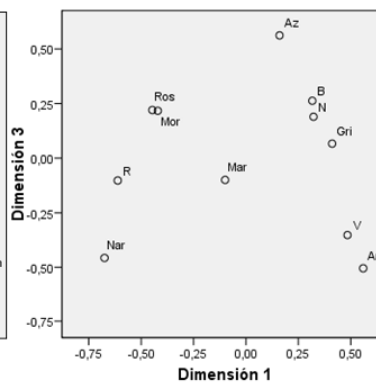
A



B



C



D

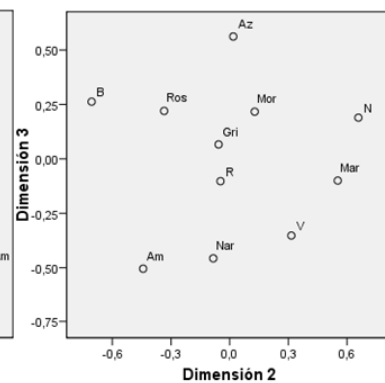


Figura 7.1. Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS tridimensional aplicado a los observadores mayores que pasaron los tests. Se muestra una representación tridimensional (A) y los planos resultantes de combinar las diferentes dimensiones (B-D). En los análisis se empleó como matriz de entrada la matriz grupal con información sobre las conexiones entre categorías (estrategia A). Nótese que la segunda dimensión es claramente acromática, mientras que la primera y la tercera son claramente cromáticas (compárese con la Figura 6.4).

Tabla 7.8. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de los análisis MDS realizados a partir de la matriz grupal de tricrómatas normales jóvenes y observadores mayores (Estrategia A). (El plano formado por las dimensiones D1 y D2 de la solución obtenida en mayores con defectos tritán se rotó 50,1° en el sentido contrario a las agujas del reloj después de reflejar D2, con el objetivo de maximizar la correlación con las dos primeras dimensiones de la solución obtenida en observadores mayores que pasaron los tests).

		Mayores que pasaron los tests			Mayores con defectos tritán		
		D1	D2	D3	D1	D2	D3
TN jóvenes	D1	,95	,15	,05	,96	,35	,19
	D2	,05	-,22	-,79	-,04	-,55	-,06
	D3	-,11	,77	-,11	-,03	,62	-,34
Mayores que pasaron los tests	D1	-	-	-	,90	,23	,28
	D2	-	-	-	,11	,81	-,46
	D3	-	-	-	-,01	,48	,40

Tabla 7.9. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de observadores mayores que pasaron los tests. A, B, C: Estrategia empleada para derivar las matrices de similaridad a partir de la información sobre conexiones entre categorías.

		D1			D2			D3		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
D1	A	1	,996	,907	,000	,059	-,004	,000	-,065	-,220
	B		1	,921	-,064	,000	,043	,061	,000	-,184
	C			1	,046	,123	,000	,309	,229	,000
D2	A				1	,992	-,865	,000	-,078	,090
	B					1	-,873	,089	,000	,132
	C						1	-,163	-,092	,000
D3	A							1	,985	,681
	B								1	,724
	C									1

La Tabla 7.8 muestra las correlaciones de estas dimensiones con las encontradas en tricrómatas normales jóvenes y observadores mayores. Mientras que la correlación entre la primera dimensión de mayores con defectos tritán es muy elevada (0,96 y 0,90) con la D1 de los otros dos grupos, etiquetada como *rojo-verde*, la correlación de la segunda dimensión es media o media alta con dos de las dimensiones de los otros dos grupos. Por una parte, la correlación más alta se da con la dimensión etiquetada como claridad: D3 en TN jóvenes (0,62) y D2 en mayores que pasaron los tests (0,81). Pero también existe una correlación moderada con las dimensiones etiquetadas como *amarillo-azul*: D2 en TN jóvenes (-0,55) y D3 en mayores que pasaron los tests (0,48). Justo este resultado es el que hace muy difícil de interpretar la solución tridimensional en mayores con defectos tritán: es como si la actividad del mecanismo *amarillo-azul* y la dimensión claridad no pudiera ser claramente disociada.

Como puede verse, la tercera dimensión muestra un patrón de correlaciones mucho más difuso: la correlación más alta se da con D3 en TN jóvenes y con D2 en mayores que pasaron los tests, las dimensiones etiquetadas como claridad en esos grupos, pero su magnitud es moderada (-0,34 y -0,46). Este patrón fue virtualmente idéntico independientemente de la estrategia utilizada (A, B o C: el valor absoluto de las correlaciones entre las dimensiones correspondientes estuvo en torno a 0,95).

Para intentar esclarecer este patrón de resultados, la Figura 7.2 muestra comparativamente la solución bidimensional del análisis MDS aplicado a mayores con defectos tritán (las coordenadas correspondientes se muestran en la Tabla 7.10; la Tabla 7.6 muestra el valor del stress bruto normalizado correspondiente) con el plano formado por las dos primeras dimensiones en mayores que pasaron los tests. Muy al contrario de lo que sucedía con la solución 3D, la dimensión bidimensional ahora ofrece un patrón mucho más nítido: las dimensiones son claramente interpretables en términos del mecanismo cromático *rojo-verde* y del mecanismo acromático (*blanco y negro* se sitúan en los extremos). Nótese que la tercera dimensión de la solución 3D de los mayores con defectos tritán muestra una correlación moderada (0,55) con la segunda dimensión de la solución 2D (la Tabla 7.11 muestra las correlaciones pertinentes). Esto no sucedía con el grupo de TN jóvenes: para ellos, la tercera dimensión emergía como independiente de las dos primeras (Tabla 6.10), lo que apoya la interpretación de que la actividad del mecanismo *amarillo-azul* y la dimensión claridad, son más difíciles de descorrelacionar en el caso de los mayores con defectos tritán.

Como muestran las elevadas correlaciones de la Tabla 7.12, existe un gran parecido entre las soluciones bidimensionales de ambos grupos de observadores mayores, si bien a la vez son destacables diferencias muy importantes. La comparación de los resultados derivados de la aplicación del análisis MDS puede resumirse de la siguiente manera:

1. La solución 2D se ajusta muy bien a mayores con defectos tritán, pero es claramente insuficiente para los que pasaron los tests: del MDS tridimensional aplicado a estos últimos, emerge claramente una tercera dimensión etiquetable como *amarillo-azul* (Figuras 7.1B-C), dimensión que en ningún caso surge (al menos como dimensión independiente) en el caso de los mayores con defectos tritán. Este patrón está íntimamente asociado a dos resultados importantes:

2. Las categorías *azul* y *verde* se encuentran mucho más próximas en la solución bidimensional de mayores con defectos tritán (Figura 7.2B) que en el caso de los mayores que pasaron los tests (Figura 7.2C). Igualmente:
3. Las categorías *marrón* y *morado* se encuentran mucho más próximas en la solución bidimensional de mayores con defectos tritán (Figura 7.2B) que en el caso de los mayores que pasaron los tests (Figura 7.2C).

Como se volverá a desarrollar en la discusión, una forma de interpretar estos resultados es la siguiente: la actividad del mecanismo *amarillo-azul*, que en tricrómatas normales jóvenes se revela muy útil de cara a discriminar entre estímulos pertenecientes a categorías diferentes, se deteriora con la edad, y lo hace sobre todo para estímulos de claridad baja, lo que puede influir de forma importante sobre el espacio de color. La mejor prueba de ello proviene de la comparación de la evolución de las distancias entre las categorías *amarillo* y *azul*, por un lado, y *marrón* y *morado*, por otro. Efectivamente, si se comparan las soluciones de los análisis MDS en distintos grupos de observadores, se puede ver claramente la progresiva reducción que sufre la distancia entre las categorías *marrón* y *morado*: ambas se encuentran muy alejadas en la solución de los TN jóvenes (Figuras 6.3-A1, 6.3-B1, 6.3-C1 y 6.4), distancia que se ve reducida en el caso de los mayores que pasaron los tests (Figura 7.1), y que prácticamente desaparece en el caso de los mayores con defectos tritán (Figura 7.2B). En comparación, la distancia entre el par *amarillo-azul* se ve menos afectada.

La Figura 7.3 muestra que si bien los resultados derivados de aplicar la estrategia B (Figura 7.3B) son prácticamente idénticos a los descritos para la estrategia A (Figuras 7.3A y 7.2B), no ocurre lo mismo para los resultados obtenidos empleando los datos derivados de emplear a la estrategia C (Figura 7.3C) (la Tabla 7.13 muestra las coordenadas correspondientes, y la Tabla 7.14, las correlaciones entre las dimensiones obtenidas a partir de las distintas estrategias). En este último caso, la solución parece interpretable en términos de una dimensión acromática (D2) y otra cromática (D1), pero que no se ajusta exactamente a lo esperable a partir de la actividad del mecanismo *rojo-verde*. En su lugar, parece más acorde a una descripción en términos de saturación: *blanco*, *gris*, *marrón* y *negro* aparecen en un extremo, y *naranja* y *amarillo* en el otro. Es decir, esta solución no recoge de forma diferencial la actividad de ningún mecanismo cromático oponente.

Tabla 7.10. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en la solución bidimensional del análisis MDS no métrico aplicado a la matriz grupal de mayores con defectos tritán mostrada en la Tabla 7.2.2 (Estrategia A). Se muestran las coordenadas de la solución original, y una vez reflejada y rotada 51,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj, para maximizar la correlación con la solución bidimensional de los mayores que pasaron los tests (véase la Tabla 7.12). D1: dimensión 1, D2: dimensión 2.

	Mayores con defectos tritán (sin rotar)		Mayores con defectos tritán (solución rotada)	
	D1	D2	D1	D2
B	,503	,785	,300	-,883
N	-,671	-,403	,103	,776
R	,600	-,486	-,754	-,165
V	-,589	,144	,480	,371
Am	,178	,527	,301	-,468
Az	-,659	,172	,545	,408
Mar	-,246	-,399	-,158	,441
Ros	,676	-,099	-,500	-,467
Nar	,615	-,305	-,622	-,290
Mor	-,092	-,418	-,269	,333
Gri	-,315	,483	,574	-,055

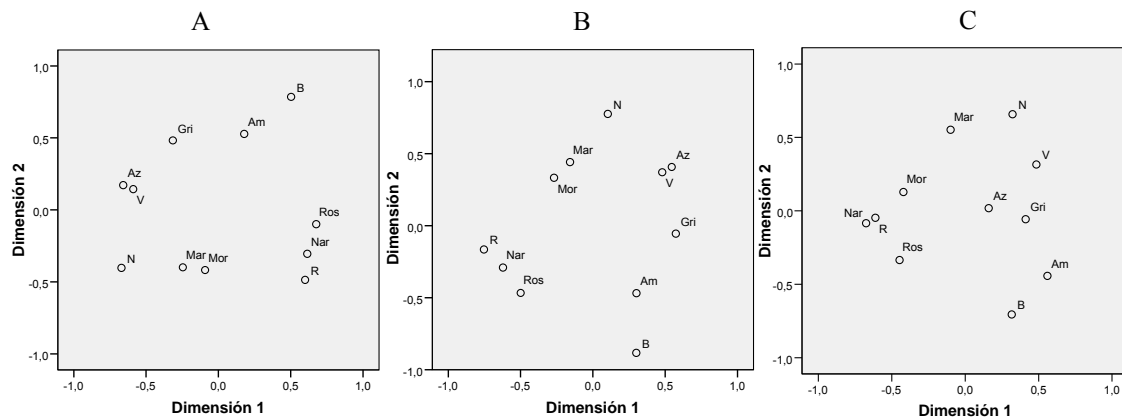


Figura 7.2. Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS bidimensional aplicado a observadores mayores. Se muestra la solución obtenida para mayores con defectos tritán sin rotar (A) y con las dimensiones reflejadas y rotadas 51,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj (B) para facilitar la comparación con el plano formado por D1 y D2 de la solución obtenida para mayores que pasaron los tests (C: idéntica a la Figura 7.1B).

Tabla 7.11. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensional y tridimensional de los análisis MDS realizados a partir de la matriz grupal de mayores con defectos tritán (Estrategia A).

		Solución 2D	
Solución		D1	D2
		-,97	,10
3D	D2	-,02	,80
	D3	,22	,55

Tabla 7.12. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en la solución tridimensional del análisis MDS aplicado a mayores que pasaron los tests y la solución bidimensional del análisis MDS aplicado a mayores con defectos tritán (Estrategia A). La solución obtenida para mayores con defectos tritán fue reflejada y rotada 51,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj.

		Mayores con defectos tritán	
Mayores que pasaron los tests		D1	D2
	D1	,93	,11
	D2	-,01	,94
	D3	,20	,19

Tabla 7.13. Coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones bidimensionales del análisis MDS no métrico aplicados a las matrices grupales de mayores con defectos tritán mostradas en las Tablas 7.2.2 (estrategia A), 7.3.2 (estrategia B) y 7.4.2 (estrategia B). Las dimensiones de las soluciones derivadas de las estrategias A y B han sido reflejadas y rotadas 51,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj; la solución derivada de la estrategia C ha sido rotada 30° en el sentido contrario a las agujas del reloj. D1, D2: dimensiones 1 y 2.

	A		B		C	
	D1	D2	D1	D2	D1	D2
B	,300	-,883	,203	-,948	-,512	,714
N	,103	,776	,095	,773	-,402	-,507
R	-,754	-,165	-,785	-,278	,353	,594
V	,480	,371	,457	,395	,286	-,515
Am	,301	-,468	,457	-,409	,812	-,187
Az	,545	,408	,556	,402	,051	-,674
Mar	-,158	,441	-,102	,360	-,568	-,256
Ros	-,500	-,467	-,463	-,509	,206	,638
Nar	-,622	-,290	-,657	-,087	,597	,142
Mor	-,269	,333	-,225	,302	-,237	-,034
Gri	,574	-,055	,464	-,001	-,586	,086

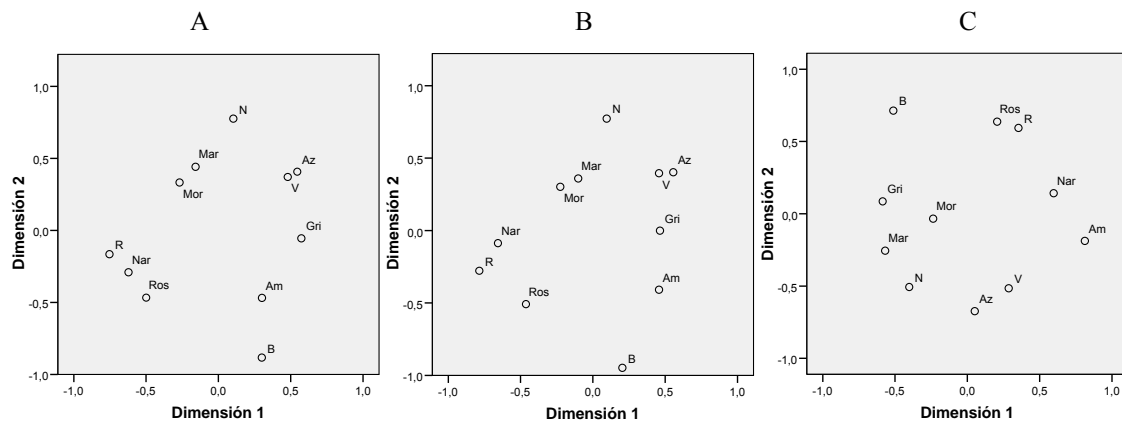


Figura 7.3. Representaciones de las coordenadas de las 11 CCB obtenidas en las soluciones del análisis MDS bidimensional aplicado a mayores con defectos tritán. Se muestran las soluciones obtenidas para mayores con defectos tritán a partir de las matrices grupales derivadas de aplicar las estrategias A (A), B (B) y C (C). Las dimensiones de las soluciones derivadas de las estrategias A y B han sido reflejadas y rotadas 51,4° en el sentido contrario a las agujas del reloj; la solución derivada de la estrategia C ha sido rotada 30° en el sentido contrario a las agujas del reloj.

Tabla 7.14. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones bidimensionales de los diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de mayores con defectos tritán. A, B, C: Estrategia empleada para derivar las matrices de similaridad a partir de la información sobre conexiones entre categorías.

		D1			D2		
		A	B	C	A	B	C
D1	A	1	,989	,773	,000	-,004	,578
	B		1	,711	-,001	,000	,669
	C			1	,018	,020	,000
D2	A				1	,984	,116
	B					1	,104
	C						1

II. Frecuencia y distribución de los errores

Las Tablas 7.15.1 (mayores que pasaron los tests) y 7.15.2 (mayores con defectos tritán) muestran las matrices de confusión relativas al porcentaje de aciertos y la distribución del porcentaje de errores (de acuerdo al definido como criterio estricto). La información sobre la distribución del porcentaje de errores puede visualizarse en la Figura 7.4. Atendiendo al porcentaje de aciertos, puede verse que, para todas las categorías, la ejecución del grupo de mayores que pasaron los tests superó la del grupo de mayores con defectos tritán (más tarde se presentarán los resultados de los análisis estadísticos correspondientes). Los únicos dos casos en los que el porcentaje de aciertos no superó el 50% fueron los de *azul* (49,45%) y *morado* (44,92%) en el grupo de mayores con defectos tritán.

Respecto a la naturaleza de los errores cometidos, destacan los errores *negro-azul* y *azul-verde*, que superan el 10% en ambos tipos de observadores. Como muestra la Tabla 7.16, abundaron los errores cuyo porcentaje fue superior en los observadores mayores que cometieron errores tritán en los tests. Destacan sobre todo los errores *azul-verde* (11,53% en los mayores que pasaron los tests vs. 30,85% en los mayores con respuestas tritán), *morado-marrón* (0,28% vs. 22,00%), *naranja-rojo* (0% vs. 13,26%) y *morado-negro* (0% vs. 11,64%). El único error para el que se invirtió esta tendencia fue *morado-rosa* (19,63% vs. 9,23%).

Las Tablas 7.17.1 y 7.17.2 muestran el número de observadores que cometieron los diferentes errores. Como puede verse, mientras que todos los observadores mayores que pasaron los tests acertaron al buscar todas las categorías (diagonal principal de la Tabla 7.17.1), no sucedió lo mismo en el grupo de mayores con defectos tritán: para las categorías *morado*, *naranja* y *rosa*, no acertó la totalidad de los observadores sino 10, 13 y 14 respectivamente, de los 15 integrantes del grupo. Puede verse que los errores más comunes entre los mayores que pasaron los tests fueron los de *negro-azul* (lo cometieron 11 observadores), *morado-rosa* (10) y *marrón-negro* (8). Entre los mayores con defectos tritán, fueron los de *gris-verde* (13), *negro-azul*, *negro-gris* (12), *blanco-rosa*, *azul-verde*, *marrón-morado*, *marrón-gris*, (9) *negro-verde*, *rosa-naranja*, *morado-marrón* y *morado-rosa* (8).

Tabla 7.15.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de mapa de colores para cada TCB.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	89,47				5,18			3,46				1,89
N		76,77		4,36		11,62					3,63	3,63
R			78,16					7,57	10,54			3,73
V		3,75		91,97								4,28
Am				4,62	92,50							2,88
Az	4,71			11,53		75,00					5,36	3,41
Mar		8,04					89,24					2,72
Ros			5,63					77,50	8,38	5,27		3,23
Nar									97,26			2,74
Mor						4,09		19,63		73,11		3,16
Gri		4,77		5,70			4,25				82,08	3,21

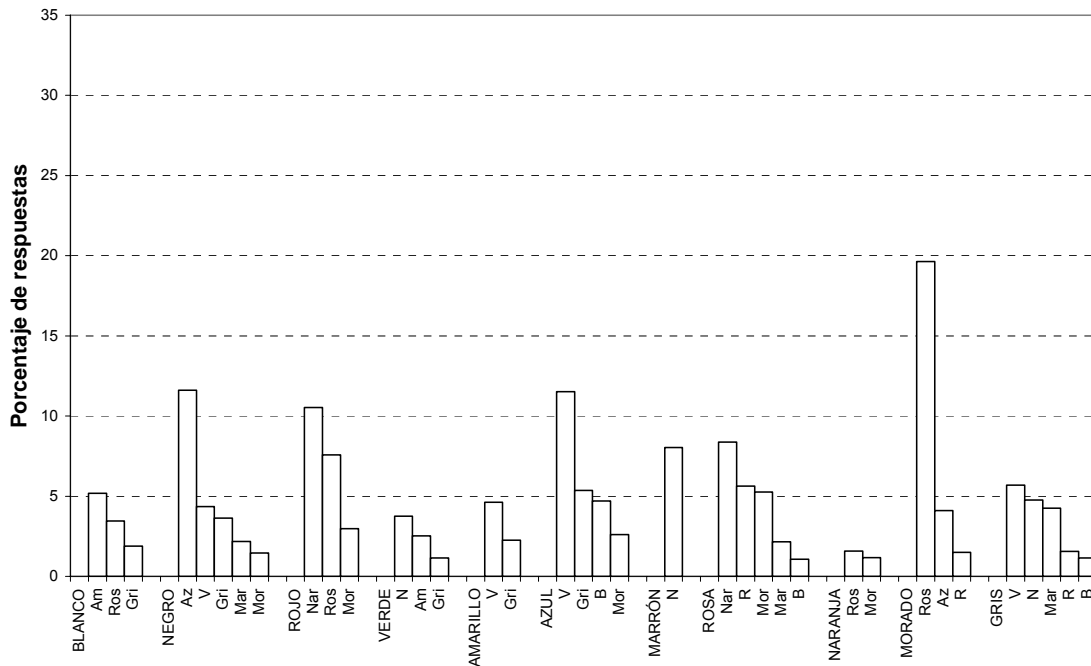
Tabla 7.15.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores para cada TCB.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	76,09			4,46	3,27			13,37				2,82
N		58,27		9,51		11,69	10,43			5,93	4,17	0,00
R			74,44					7,51	9,98	8,08		0,00
V				87,88	4,87	4,68						2,58
Am				6,94	82,02				4,13		4,71	2,21
Az		7,69		30,85		49,45	3,36				7,11	1,54
Mar		9,25					64,92			15,85	4,28	5,69
Ros			12,50					64,47	14,76	4,43		3,84
Nar			13,26		10,85			5,09	66,67			4,13
Mor		11,64		3,37		3,93	22,00	9,23		44,92		4,90
Gri		5,52		8,81			9,72			8,53	60,29	7,13

Tal y como se hizo con las matrices correspondientes en dicrómatas, las matrices de confusión contenidas en las Tablas 7.15.1 y 7.15.2 se emplearon como entrada en sendos análisis MDS no métrico. Los resultados fueron prácticamente idénticos a los obtenidos a partir de las matrices que informan sobre las conexiones entre categorías, como reflejan las elevadas correlaciones obtenidas entre las dimensiones correspondientes (Tablas 7.18.1-7.18.2). Los valores del estrés bruto normalizado de las soluciones fueron: 0,01164 (criterio laxo) y 0,00968 (criterio estricto) para los mayores que no pasaron los tests, y 0,00681 (criterio laxo) y 0,00511 (criterio estricto) para los que mostraron defectos tritán.

La Tabla 7.19 enfatiza las asimetrías más destacables detectadas en las Tablas 7.15.1 y 7.15.2. Puede verse que de entre todas ellas destaca la asimetría *verde-azul*, presente en los dos grupos, y en el mismo sentido: el porcentaje del error *azul-verde* resulta ser mucho mayor.

A



B

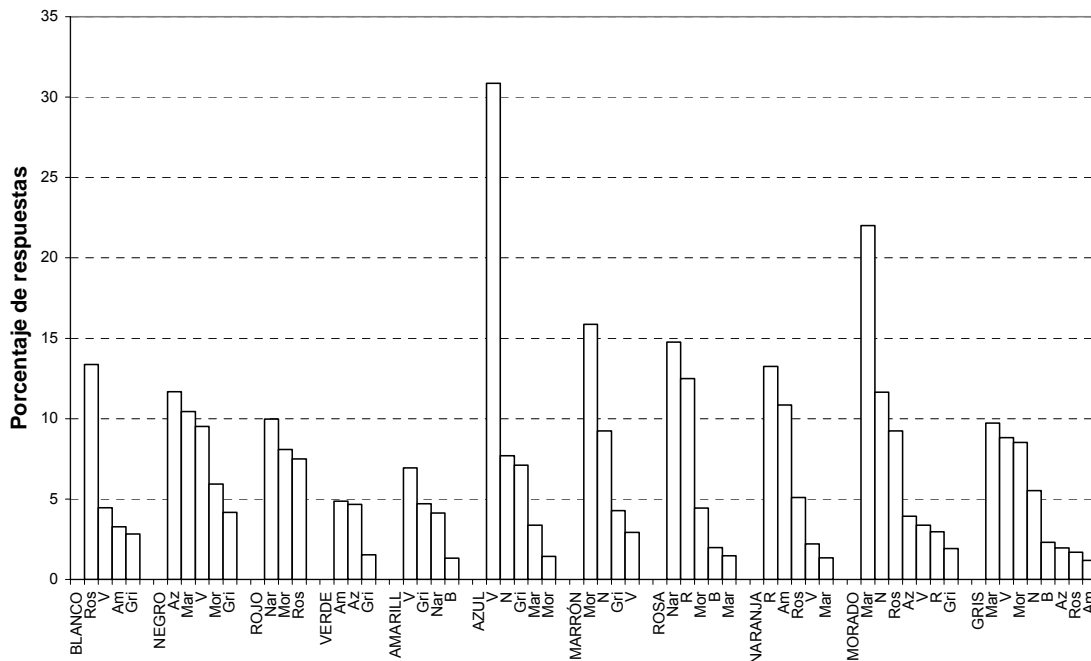


Figura 7.4. Distribución del porcentaje de errores cometidos por los observadores mayores que pasaron los tests y los observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores en función de las diferentes categorías. A: mayores que pasaron los tests. B: mayores con defectos tritán. Cada conjunto de barras representa la distribución de respuestas para la categoría indicada más a la izquierda (resaltada con mayúsculas), de manera que cada barra representa el porcentaje de selecciones correspondiente a la categoría indicada en el eje de abscisas. Figura construida a partir de las Tablas 7.15.1 y 7.15.2 (los porcentajes de error inferiores al 1% no se han representado).

Tabla 7.16. Errores más comunes tanto en observadores mayores que pasaron los tests como en observadores mayores con defectos tritán, y diferencias en los errores cometidos por ambos grupos. A partir de las Tablas 7.15.1-7.15.2. PT: mayores que pasaron los tests. DT: mayores con defectos tritán.

CCB	Porcentaje de errores superior al 10% en PT y DT	Porcentaje de errores superior en un 5% en PT vs DT	Porcentaje de errores superior en un 5% en DT vs PT
B			Ros*
N	Az*		V; Mar
R	Nar**		Mor*
V			
Am			
Az	V*		N; V
Mar			Mor
Ros			R*; Nar
Nar			R; Am
Mor		Ros	N; Mar
Gri			Mar; Mor

*: el porcentaje de los errores supera el valor indicado únicamente a partir del uso del criterio estricto para definir los acierto.

#: Nota: se ha incluido es error *rojo-naranja* a pesar de que su porcentaje es 9,98% (estrictamente <10%)

Tabla 7.17.1. Número de observadores mayores que pasaron los tests que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores. Esta matriz se ha construido a partir de las matrices individuales que resumen los errores cometidos por cada uno de los observadores (no mostradas por razones de espacio). Cada celdilla muestra el número de observadores (del total de 15) que mostraron el error correspondiente.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	15				3			3			1
N		15		2		11	1			1	6
R			15				1	6	4	6	
V			3	15	3		1				3
Am	2			3	15						1
Az	2	1		5		15		1		2	3
Mar		8	1	1			15		1	2	3
Ros	1		4				1	15	6	4	
Nar								1	15	1	
Mor	2		4	1		4	1	10		15	2
Gri	1	1	1	5		1	5	1			15

Tabla 7.17.2. Número de observadores mayores con defectos tritán que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores. Se muestra la misma información que en la Tabla 7.17.1 pero para mayores con defectos tritán.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	15			2	2			9			2
N		15		8		12	7			6	12
R			15					6	6	5	
V			4	15	4	3				1	3
Am	2			1	4	15	1	2	2		2
Az		6		9		15	3	1		2	6
Mar	1	7	3	4	1	4	15	2	1	9	9
Ros	2		5				1	14	8	4	1
Nar	1		3	3	4		1	3	13	2	
Mor		3	4	4		4	8	8		10	5
Gri	3	2		13	2	3	5	5		7	15

Tabla 7.18.1. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de los observadores mayores que pasaron los tests. C (A): se corresponde con la solución MDS obtenida a partir de la matriz de confusión que informa sobre las conexiones entre categorías siguiendo la Estrategia A (Tabla 7.2.1). E (L): Errores siguiendo el criterio laxo. E (E): Errores siguiendo el criterio estricto (Tabla 7.15.1).

		D1			D2			D3		
		C (A)	E (L)	E (E)*	C (A)	E (L)	E (E)*	C (A)	E (L)	E (E)*
D1	C (A)	1	,964	,954	,000	,113	-,150	,000	,140	-,177
	E (L)		1	,987	,210	,000	,047	,060	,000	-,078
	E (E)*			1	,167	,066	,000	,137	-,060	,000
D2	C (A)				1	-,836	,979	,000	-,281	,015
	E (L)					1	-,893	,121	,000	,182
	E (E)*						1	-,007	-,277	,000
D3	C (A)							1	-,852	,943
	E (L)								1	-,866
	E (E)*									1

Tabla 7.18.2. Correlaciones entre las dimensiones obtenidas en las soluciones tridimensionales de diferentes análisis MDS realizados a partir de las matrices grupales de los observadores mayores con defectos tritán. Se muestra la misma información que en la Tabla 7.18.1 pero para mayores con defectos tritán.

		D1			D2			D3		
		C (A)	E (L)	E (E)*	C (A)	E (L)	E (E)*	C (A)	E (L)	E (E)*
D1	C (A)	1	,980	-,986	,000	,161	,008	,000	-,026	-,060
	E (L)		1	-,979	-,156	,000	-,152	-,017	,000	-,083
	E (E)*			1	-,017	-,142	,000	,069	,108	,000
D2	C (A)				1	,914	,947	,000	-,344	,294
	E (L)					1	,982	,344	,000	-,048
	E (E)*						1	,308	-,050	,000
D3	C (A)							1	,911	-,909
	E (L)								1	-,961
	E (E)*									1

Tabla 7.19. Asimetrías más destacables detectadas en las Tablas 7.15.1-7.15.2. Se muestran aquellas asimetrías en las que la búsqueda de una de las categorías del par produjo como mínimo un 5% de errores más que la búsqueda de la otra categoría para alguno de los dos grupos. Fuera del paréntesis se muestra el porcentaje correspondiente (a partir de las Tablas 7.15.1-7.15.2), y entre paréntesis, el número de observadores que cometió el error (a partir de las Tablas 7.17.1-7.17.2).

	Mayores que pasaron los tests		Mayores con defectos tritán	
	Buscando la 1ª categoría	Buscando la 2ª categoría	Buscando la 1ª categoría	Buscando la 2ª categoría
B-Ros	3,46 (3)	1,08 (1)	13,37 (9)	1,97 (2)
N-V	4,36 (2)	3,75 (3)	9,51 (8)	0,95 (4)
N-Az	11,62 (11)	0,16 (1)	11,69 (12)	7,69 (6)
N-Mar	2,18 (1)	8,04 (8)	10,43 (7)	9,25 (7)
N-Mor	1,45 (1)	0,00 (0)	5,93 (6)	11,64 (3)
R-Nar	10,54 (4)	0,00 (0)	9,98 (6)	13,26 (3)
R-Mor	2,96 (6)	1,49 (4)	8,08 (5)	2,97 (4)
V-Az	0,00 (0)	11,53 (5)	4,68 (3)	30,85 (9)
V-Gri	1,15 (3)	5,70 (5)	1,53 (2)	8,81 (2)
Am-Nar	0,00 (0)	0,00 (0)	4,13 (2)	10,85 (4)
Az-Gri	5,36 (3)	0,41 (1)	7,11 (6)	1,96 (3)
Mar-Mor	0,64 (2)	0,68 (1)	15,85 (9)	22,00 (8)
Mar-Gri	0,64 (3)	4,25 (5)	4,28 (9)	9,72 (5)
Ros-Nar	8,38 (6)	1,58 (1)	14,76 (8)	5,09 (13)
Ros-Mor	5,27 (4)	19,63 (10)	4,34 (4)	9,23 (8)
Mor-Gri	0,47 (2)	0,00 (0)	1,93 (5)	8,53 (7)
Mor-Gri	0,00 (0)	4,89 (7)	0,98 (2)	12,41 (7)

Tanto a nivel grupal como individual, se estableció el *porcentaje global de aciertos*, la *media del porcentaje de aciertos a través de las 11 CCBs*, y el *índice de solapamiento* con el mapa de colores de los TN. La Tabla 7.20 muestra el índice de solapamiento entre los grupos, y la Tabla 7.21 amplía esta información a nivel individual.

Tabla 7.20. Solapamiento entre los mapas de color de tricrómatas normales, mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán, establecidos a nivel grupal. PT: mayores que pasaron los tests. DT: mayores con defectos tritán.

	TN	PT	DT
TN	100	89,31	72,98
PT		100	78,06
DT			100

Tabla 7.21. Diferentes medidas de la ejecución de mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores (criterio estricto). PT: mayores que pasaron los tests, DT: mayores con defectos tritán. Se muestran las medidas de ejecución tanto a nivel grupal (en negrita) como a nivel individual, identificando a cada individuo mediante su grupo de pertenencia (PT o DT), un número (de 1 a 15), y sus iniciales.

	Porcentaje de aciertos	Porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB	Índice de solapamiento con TN
PT	84,12	83,91	85,19
PT1: AG	87,10	87,41	87,15
PT2: FGL	88,46	88,45	87,68
PT3: VI	90,16	90,77	88,62
PT4: DP	71,88	73,90	72,43
PT5: PA	80,77	82,37	83,72
PT6: CGA	85,11	87,95	85,82
PT7: MFR	73,00	76,15	76,43
PT8: ELP	87,01	87,36	87,64
PT9: MCM	89,19	92,58	90,38
PT10: AAD	87,88	86,86	86,77
PT11: CGD	96,00	96,36	92,59
PT12: ANA	78,18	78,12	80,30
PT13: RGP	84,62	87,79	85,57
PT14: EAG	88,61	87,59	88,11
PT15: CG	84,78	86,58	86,59
DT	65,98	66,31	68,07
DT1: SA	50,94	54,47	54,84
DT2: MA	57,14	66,33	64,37
DT3: FRM	73,33	63,41	78,30
DT4: JSS	91,94	92,12	92,15
DT5: RF	68,04	69,20	72,66
DT6: CB	58,10	63,21	65,05
DT7: RM	79,49	82,20	80,79
DT8: GD	39,08	41,82	43,20
DT9: FB	51,90	52,59	53,68
DT10: NC	78,13	79,59	82,01
DT11: AC	72,94	74,26	76,79
DT12: PC	68,60	67,62	70,02
DT13: MD	52,94	54,67	59,67
DT14: AOG	83,33	86,89	83,01
DT15: MB	87,27	86,04	85,08

Los resultados de la aplicación de la prueba estadística *U* de Mann-Whitney, empleada para comparar la ejecución de los dos grupos de observadores mayores, pueden resumirse de la siguiente manera:

1. Tomando como VD el **porcentaje de aciertos a nivel global** (columna 2 de la Tabla 7.21) existieron **diferencias significativas** entre los dos grupos de observadores mayores (medianas según el criterio estricto: 87,01 para los que pasaron los tests vs. 68,60 para los que mostraron defectos tritán; $U = 35$, $p < 0,005$) (criterio laxo: 95,74 vs. 79,07; $U = 26$, $p < 0,001$). (Este resultado se mantiene si en lugar de emplear como VD el porcentaje de aciertos se utiliza el porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB o el índice de solapamiento con TN, variables que aparecen en las columnas 3 y 4 de la Tabla 7.21).
2. Tomando como VD el **porcentaje de errores cometidos para cada CCB**, (Figura 7.5), los mayores con defectos tritán cometieron un porcentaje de errores significativamente mayor que los que pasaron los tests para las siguientes categorías: **negro** (medianas según el criterio estricto: 16,67 vs. 44,44; $U = 50,5$, $p < 0,01$; criterio laxo: 0 vs. 18,18; $U = 47$, $p < 0,005$), **azul** (16,67 vs. 42,86; $U = 57,5$, $p < 0,05$; 0 vs. 37,5; $U = 49$, $p < 0,005$), **marrón** (6,67 vs. 33,33; $U = 39,5$, $p < 0,005$; 6,67 vs. 30,77; $U = 45$, $p < 0,005$), **naranja** (0 vs. 25; $U = 53$, $p < 0,01$ para ambos criterios), **morado** (25 vs. 50; $U = 37$, $p < 0,01$; 0 vs. 50; $U = 27$, $p < 0,001$), y **gris** (diferencias significativas únicamente para el criterio laxo: 16,67 vs. 35,71; $U = 62$, $p < 0,05$).

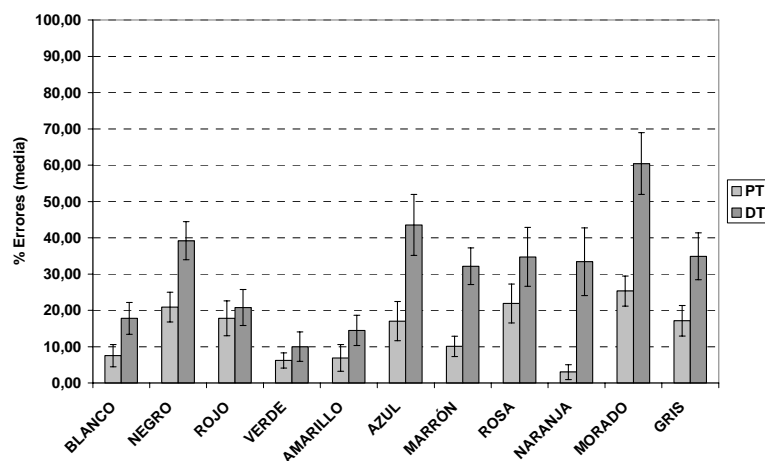


Figura 7.5. Promedio del porcentaje de errores cometidos por observadores mayores que pasaron los tests y los que mostraron defectos tritán. A partir del criterio estricto para definir los aciertos. Barras de color gris claro: observadores que pasaron los tests. Barras de color gris oscuro: observadores con defectos tritán. Las barras de error muestran el error típico de la media.

Con respecto a la variable frecuencia de selección, los análisis efectuados mostraron el siguiente patrón de resultados:

- Los análisis no paramétricos de la varianza (Kruskal-Wallis) mostraron la existencia de diferencias estadísticamente significativas para las categorías **negro** [$\chi^2_{(2,45)} = 10,24, p < 0,01$], **verde** [$\chi^2_{(2,45)} = 8,26, p < 0,05$], y **morado** [$\chi^2_{(2,45)} = 7,83, p < 0,05$]. La aplicación de la prueba U de Mann-Whitney reveló que:

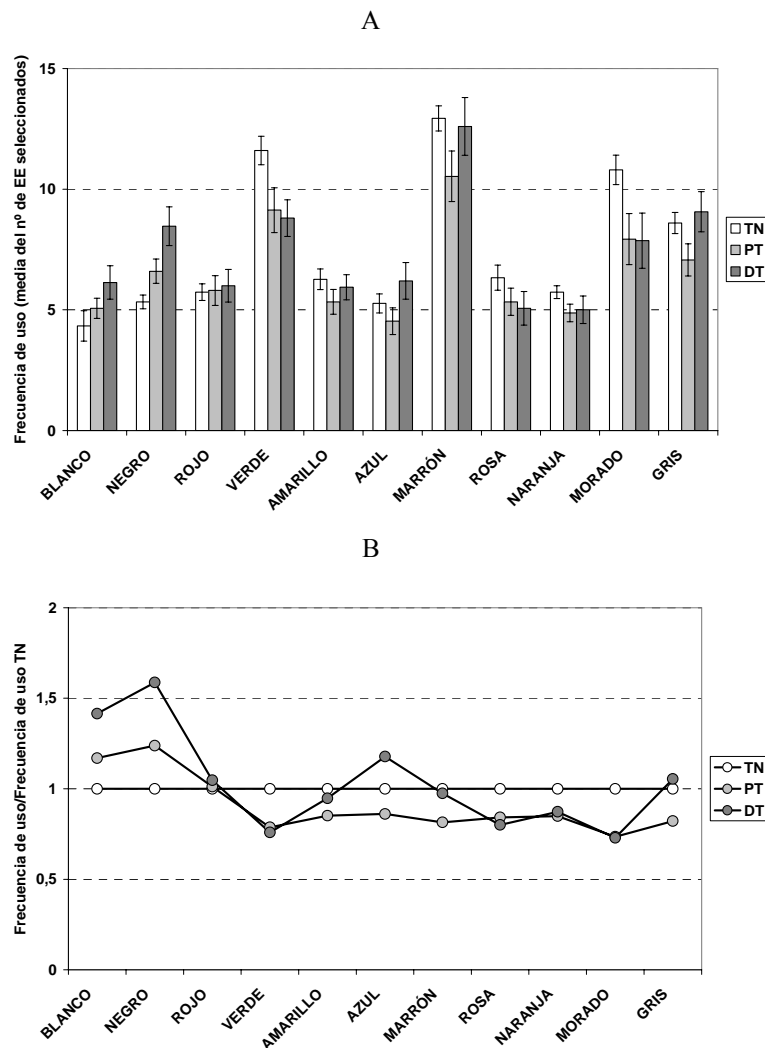


Figura 7.6. Frecuencia de selección de estímulos para cada TCB por parte de tricrómatas normales, mayores que pasaron los tests y mayores con defectos tritán. Esta figura es análoga a la Figura 6.8. A: Promedio de la frecuencia de selección. Barras blancas: tricrómatas normales. Barras de color gris claro: mayores que pasaron los tests. Barras de color gris oscuro: mayores con defectos tritán. Las barras de error muestran el error típico de la media. B: Ratio entre el promedio de la frecuencia de selección en cada grupo de observadores y el promedio de la frecuencia de selección en tricrómatas normales para cada TCB. Puntos blancos: tricrómatas normales. Puntos de color gris claro: mayores que pasaron los tests. Puntos de color gris oscuro: mayores con defectos tritán.

- a. **Tanto los mayores que pasaron los tests, como los que cometieron errores de tipo tritán, seleccionaron *más* estímulos dentro de las CCB *negro* que los TN** (se indican las medianas para TN, PT y DT: 5, 7, 9), sin existir diferencias entre ambos tipos de observadores mayores (PT vs TN, $U = 62,5$, $p < 0,05$; DT vs TN: $U = 45$, $p < 0,005$).
- b. **Tanto los mayores que pasaron los tests, como los que cometieron errores de tipo tritán, seleccionaron *menos* estímulos dentro de la CCB *morado* que los TN** (medianas: 11, 6, 7), sin existir diferencias entre ambos tipos de observadores mayores (P vs TN, $U = 53$, $p < 0,05$; D vs TN: $U = 57$, $p < 0,05$).
- c. **Los mayores con defectos tritán seleccionaron *menos* estímulos dentro de la CCB *verde* que los TN**, sin existir diferencias significativas para el resto de comparaciones (se indican las medianas para TN, PT y DT: 12, 8, 8. DT vs TN: $U = 40$, $p < 0,05$).

Nótese que en ningún caso los dos grupos de observadores mayores se diferenciaron significativamente en la frecuencia de selección. Tomando como variable independiente la variable *ratio de la frecuencia de selección* y como variables dependientes el número de aciertos, el número de errores, y el porcentaje de errores, en diferentes análisis de regresión lineal, se encontraron los siguientes resultados:

- Tomando los datos agregados de los dos grupos de observadores mayores, existió una relación lineal positiva estadísticamente significativa entre la ratio de la frecuencia de uso y el número de aciertos (criterio laxo: $R^2 = 0,59$, $F_{(1,28)} = 40,14$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,37$, $F_{(1,15)} = 16,14$, $p < 0,001$). Sin embargo, tomando los datos de los dos grupos por separado, se observó que:
 - a. La fuerza de esta relación fue mucho mayor para los observadores mayores que pasaron los tests (criterio laxo: $R^2 = 0,96$, $F_{(1,13)} = 392,99$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,91$, $F_{(1,13)} = 127,17$, $p < 0,001$; Figuras 7.7-A1 y 7.7-A2 respectivamente),
 - b. que para los observadores con defectos tritán (criterio laxo: $R^2 = 0,53$, $F_{(1,13)} = 14,91$, $p = 0,005$; Figura 7.8-A1). De hecho, a partir del criterio estricto no la relación no fue estadísticamente significativa ($R^2 = 0,21$, $F_{(1,13)} = 3,56$, $p = 0,082$; Figura 7.8-A2).

- Tomando los datos agregados, también existió una relación lineal positiva estadísticamente significativa entre la ratio de la frecuencia de uso y el número de errores (criterio laxo: $R^2 = 0,45$, $F_{(1,28)} = 22,88$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,54$, $F_{(1,28)} = 33,08$, $p < 0,001$). Tomando los datos de los dos grupos por separado, se observó que la fuerza de esta relación fue similar para ambos grupos:
 - a. Observadores mayores que pasaron los tests (criterio laxo: $R^2 = 0,55$, $F_{(1,13)} = 15,79$, $p < 0,005$; criterio estricto: $R^2 = 0,63$, $F_{(1,13)} = 22,47$, $p < 0,001$; Figuras 7.7-B1 y 7.7-B2 respectivamente),
 - b. Observadores mayores con defectos tritán (criterio laxo: $R^2 = 0,59$, $F_{(1,13)} = 18,47$, $p < 0,001$; criterio estricto: $R^2 = 0,66$, $F_{(1,13)} = 25,45$, $p < 0,001$; Figuras 7.8-B1 y 7.8-B2 respectivamente),
- Tomando los datos agregados, también existió una relación lineal positiva estadísticamente significativa entre la ratio de la frecuencia de uso y el porcentaje de errores (criterio laxo: $R^2 = 0,29$, $F_{(1,28)} = 11,70$, $p < 0,005$; criterio estricto: $R^2 = 0,32$, $F_{(1,28)} = 13,00$, $p = 0,005$). Tomando los datos de los dos grupos por separado, se observó que:
 - a. La fuerza de esta relación fue algo mayor para el grupo de observadores mayores con defectos tritán (criterio laxo: $R^2 = 0,35$, $F_{(1,13)} = 7,00$, $p < 0,05$; criterio estricto: $R^2 = 0,40$, $F_{(1,13)} = 8,62$, $p < 0,05$; Figuras 7.8-C1 y 7.8-C2 respectivamente),
 - b. que para el grupo de observadores que pasaron los tests (criterio laxo: $R^2 = 0,30$, $F_{(1,13)} = 5,49$, $p < 0,05$; Figura 7.7-C1). De hecho, a partir del criterio estricto, la relación no alcanzó el nivel de significación ($R^2 = 0,22$, $F_{(1,13)} = 3,67$, $p = 0,077$; Figura 7.7-C2).

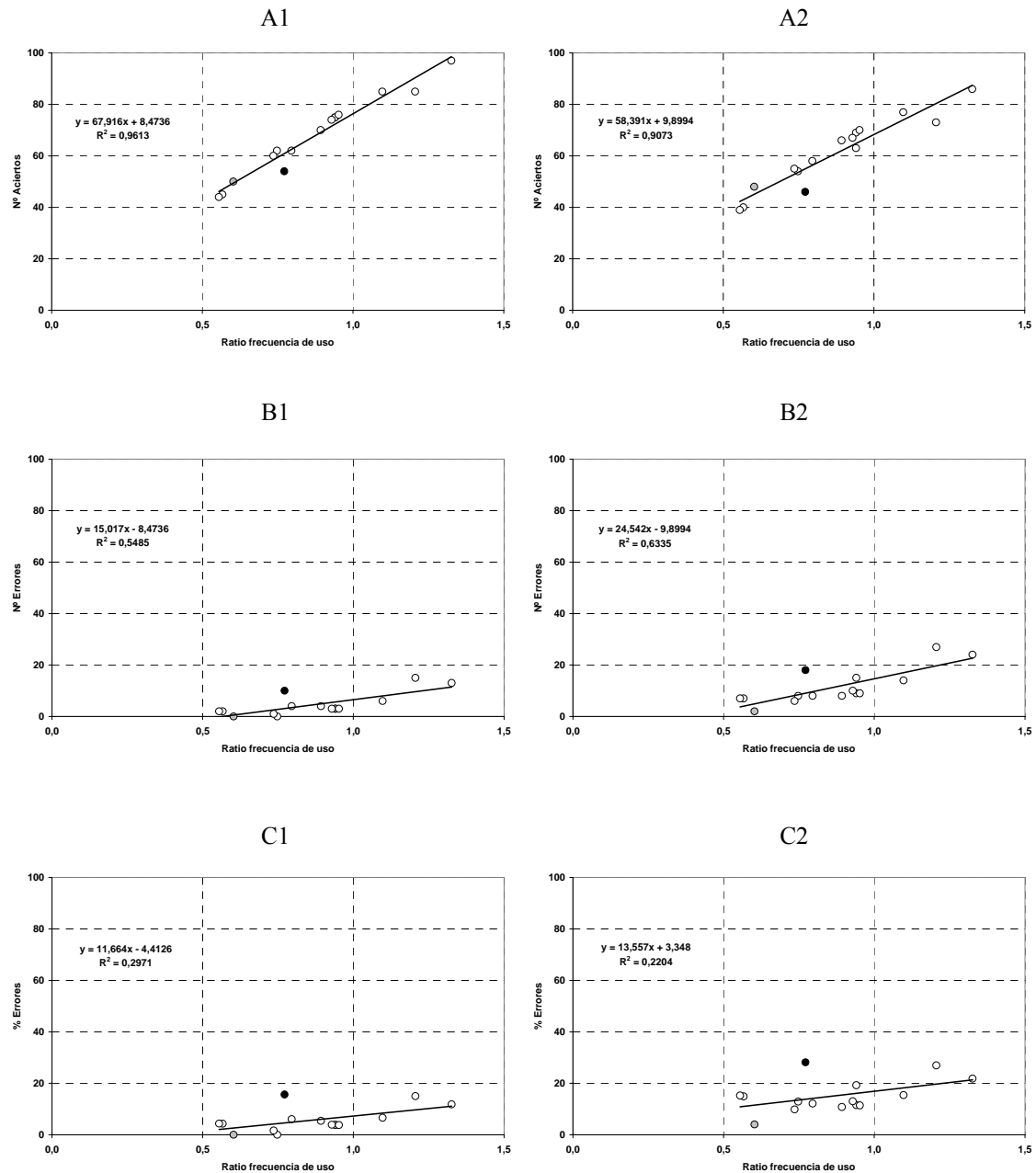


Figura 7.7. Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por los observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”. Cada columna corresponde al uso de uno de los dos criterios seguidos para definir los aciertos: criterio laxo (primera columna), criterio estricto (segunda columna). Cada fila se refiere a un aspecto diferente de la ejecución de los observadores: aciertos (primera fila), errores (segunda fila), y porcentaje de errores (tercera fila). Los puntos negros corresponden a DP (PT4), y los grises a CGD (PT11). En cada gráfica se representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados, así como la ecuación y el valor de R^2 correspondientes.

Estudio 2. Uso de términos de color básicos en personas de edad avanzada

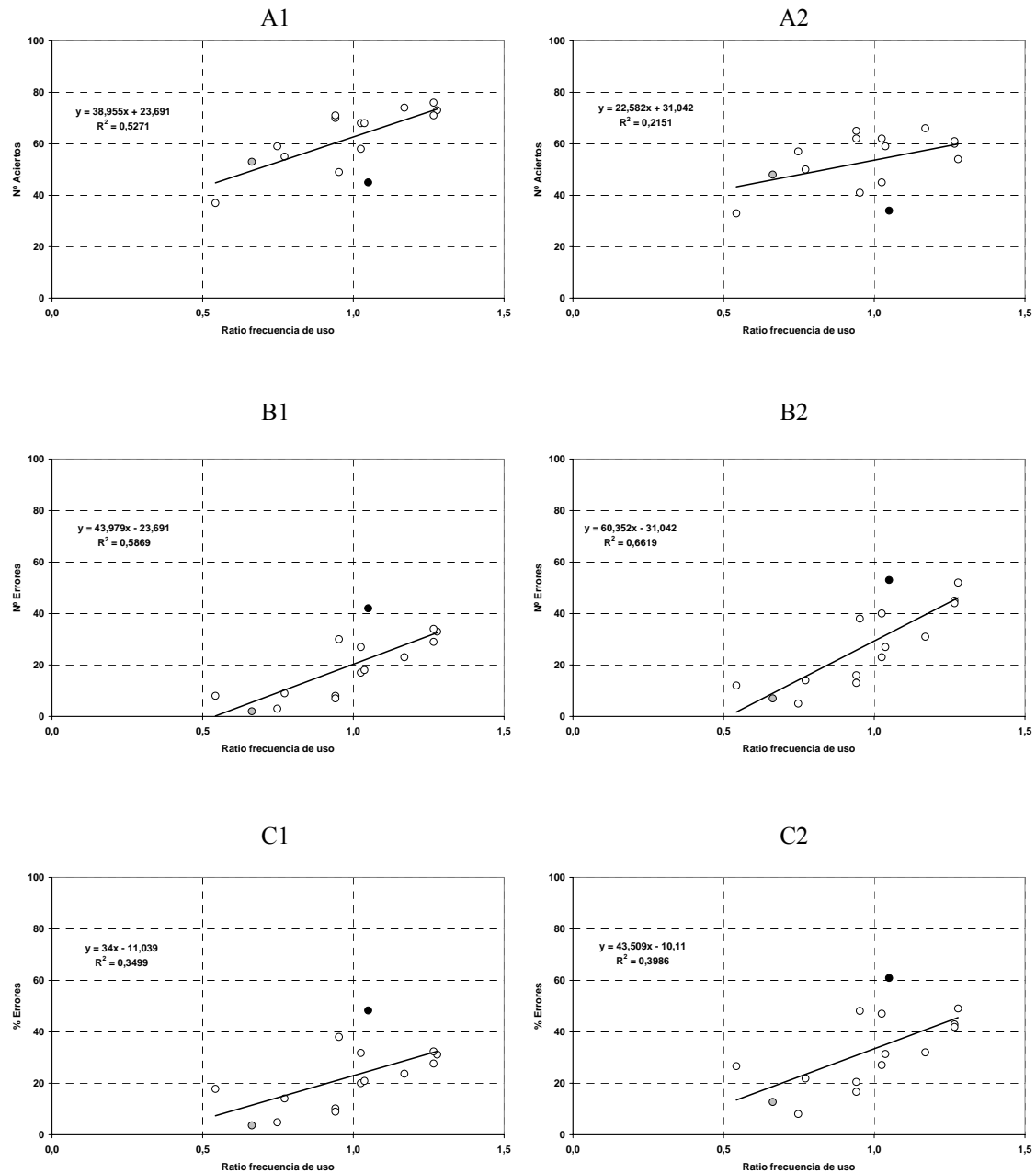


Figura 7.8. Aciertos, errores, y porcentaje de errores cometidos por los observadores mayores con defectos trítan en la tarea de mapa de colores, en función de la variable “ratio frecuencia de uso”. Cada columna corresponde al uso de uno de los dos criterios seguidos para definir los aciertos: criterio laxo (primera columna), criterio estricto (segunda columna). Cada fila se refiere a un aspecto diferente de la ejecución de los observadores: aciertos (primera fila), errores (segunda fila), y porcentaje de errores (tercera fila). Los puntos negros corresponden a GD (DT8), y los grises a MB (DT15). En cada gráfica se representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados, así como la ecuación y el valor de R^2 correspondientes.

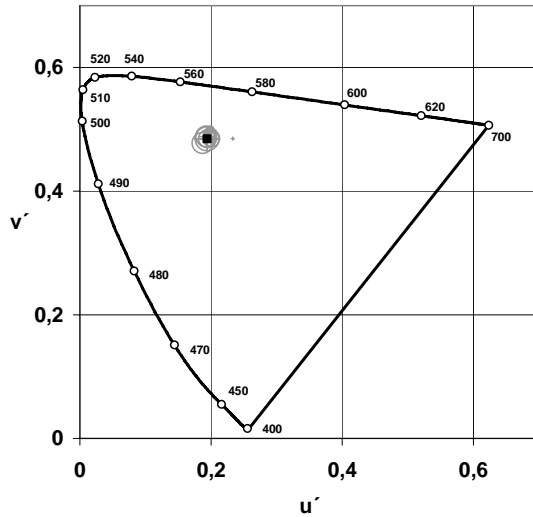
III. Análisis colorimétrico de los errores.

Las Figuras 7.9 y 7.10 representan, en el diagrama de cromaticidad $CIE_{u'v'}$ 1976, los resultados obtenidos en la tarea de mapa de colores, empleando una simbología análoga a la de las Figuras 6.12 y 6.13. Las cruces representan los estímulos seleccionados por los tricrómatas normales, y los círculos, los estímulos seleccionados por los mayores que pasaron los tests (Figura 7.9) y los que mostraron respuestas tritán (Figura 7.10).

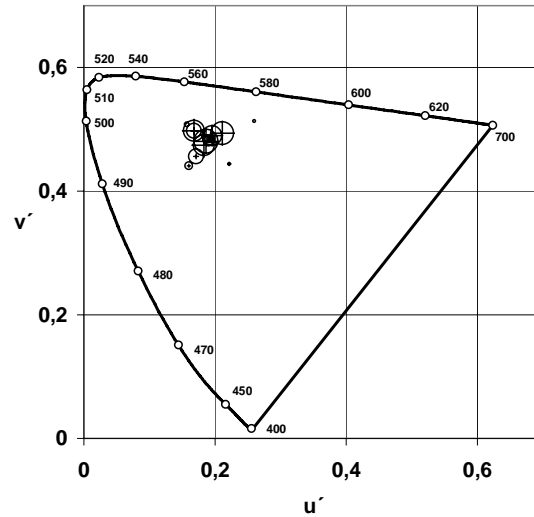
Para poder llevar a cabo los análisis colorimétricos de los errores (véanse los apartados 1.2.7 y 1.3.2.2 de la parte teórica), se determinaron, para cada estímulo, los siguientes descriptores colorimétricos:

1. **Línea de confusión tritanope correspondiente en el diagrama de cromaticidad $CIE_{u'v'}$ 1976** (punto de confusión tritanope: $u'_t = 0,257$, $v'_t = 0$). Las líneas que parten de los puntos de confusión en la Figura 7.10 (mayores que cometieron errores de tipo tritán), tienen una pendiente igual a la tg^{-1} de la mediana de la distribución de los ángulos (entre 0 y 180°) correspondientes a las líneas de confusión para los aciertos (líneas continuas) y para los errores (líneas discontinuas) (en breve se explicará por qué no pueden tomarse directamente las medianas de las distribuciones de las pendientes tritán).
2. **Cómputo de las coordenadas cromáticas (u'_f , v'_f) de acuerdo al filtrado prerretiniano.** Para computar estos valores se siguieron los pasos que se describen a continuación: 1) En primer lugar, se tomó el espectro de densidad estándar del cristalino joven (van Norren y Vos, 1974). 2) Se computó el efecto de la edad sobre el espectro de densidad del cristalino a partir del modelo de envejecimiento de Pokorny, Smith, y Lutze (1987), teniendo en cuenta que la edad media del grupo de observadores mayores que cometieron errores tritán era de 86,47 años (ecuación (27.2)). 3) Se calculó la diferencia existente entre ambos espectros (el del cristalino joven y el del cristalino envejecido). 4) El espectro resultante se convirtió a unidades de transmitancia. 5) Se recomputaron las coordenadas cromáticas de los estímulos, u'_f , v'_f , de acuerdo a la ecuación (20). La Figura 7.11 describe este procedimiento y representa los estímulos con las nuevas coordenadas cromáticas.

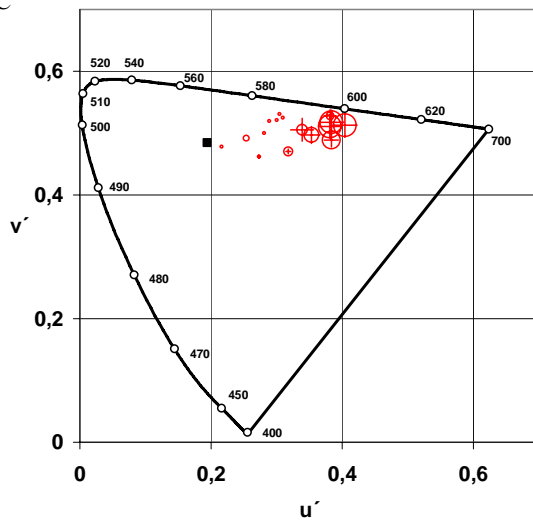
A



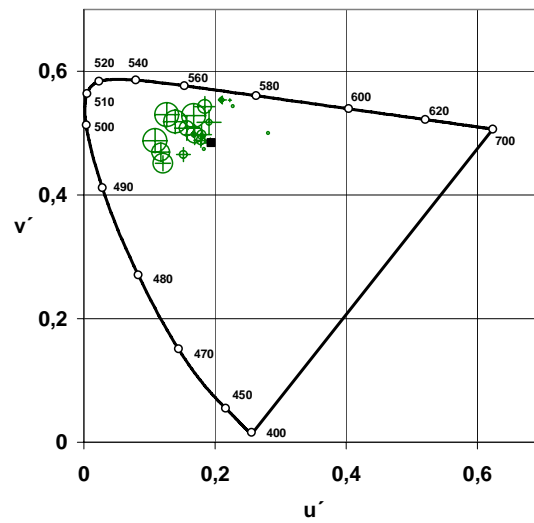
B



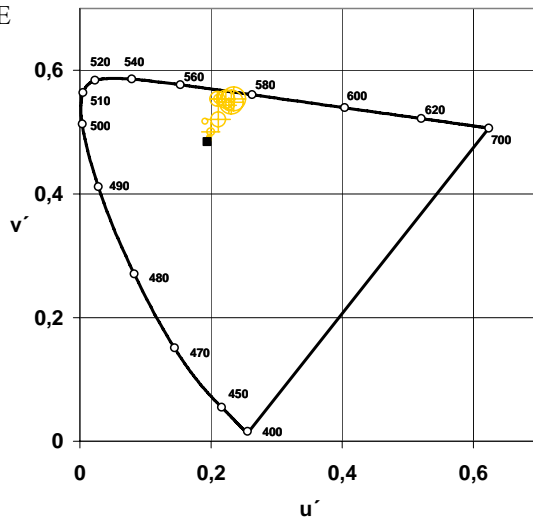
C



D



E



F

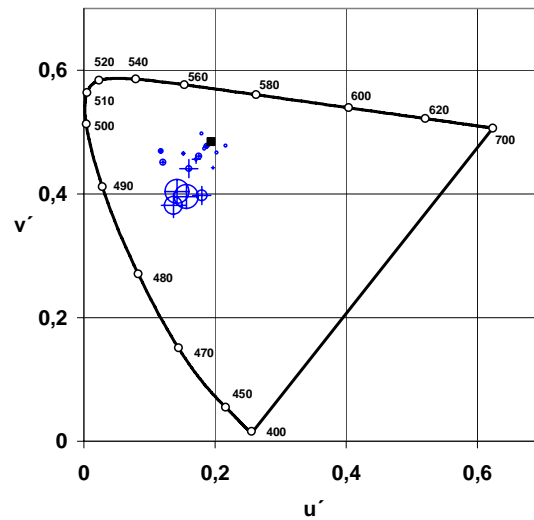
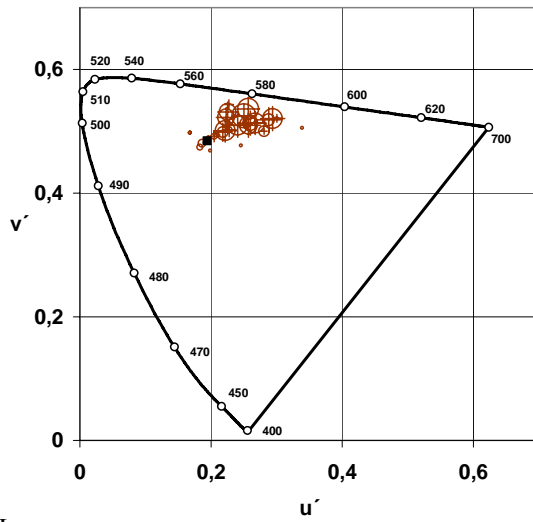
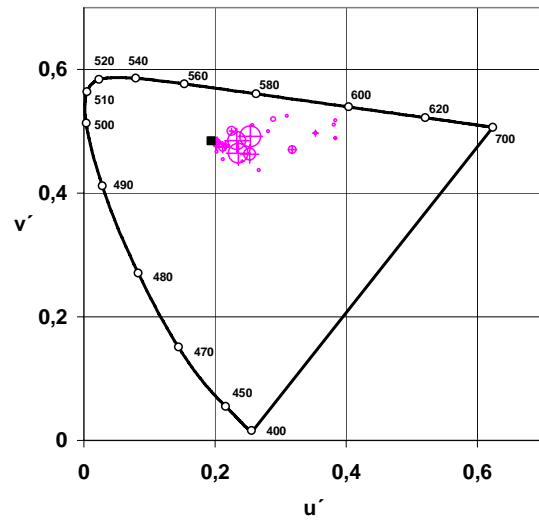


Figura 7.9. Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de mapa de colores. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Cruces: tricrómatas normales. Círculos: Mayores que pasaron los tests. El tamaño codifica la frecuencia de selección. Cuadrado negro: punto acromático. La Figura 7.9 continúa en la página siguiente.

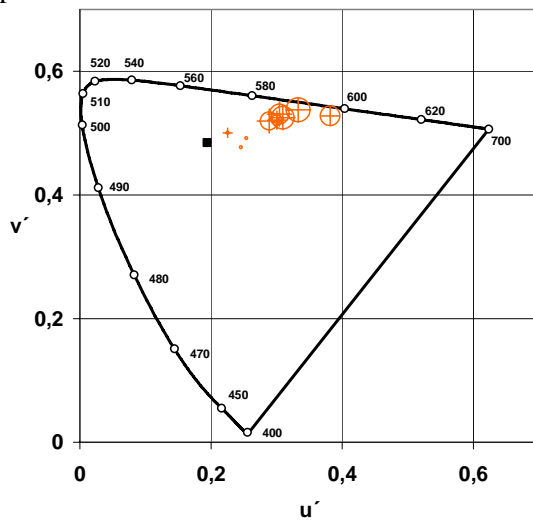
G



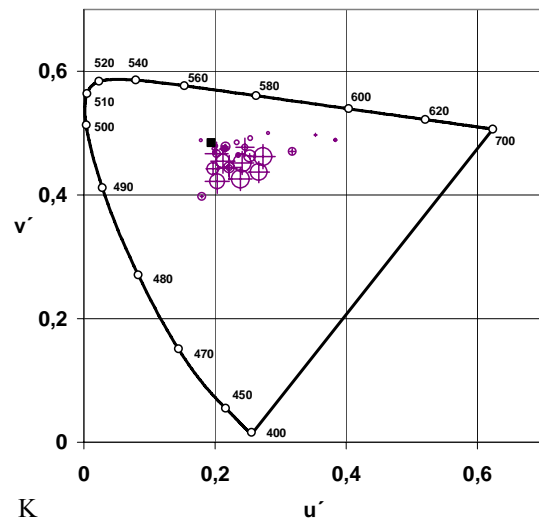
H



I



J



K

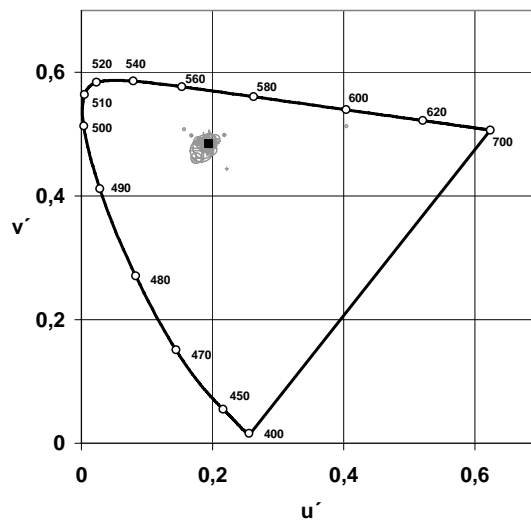


Figura 7.9. (Continuación).

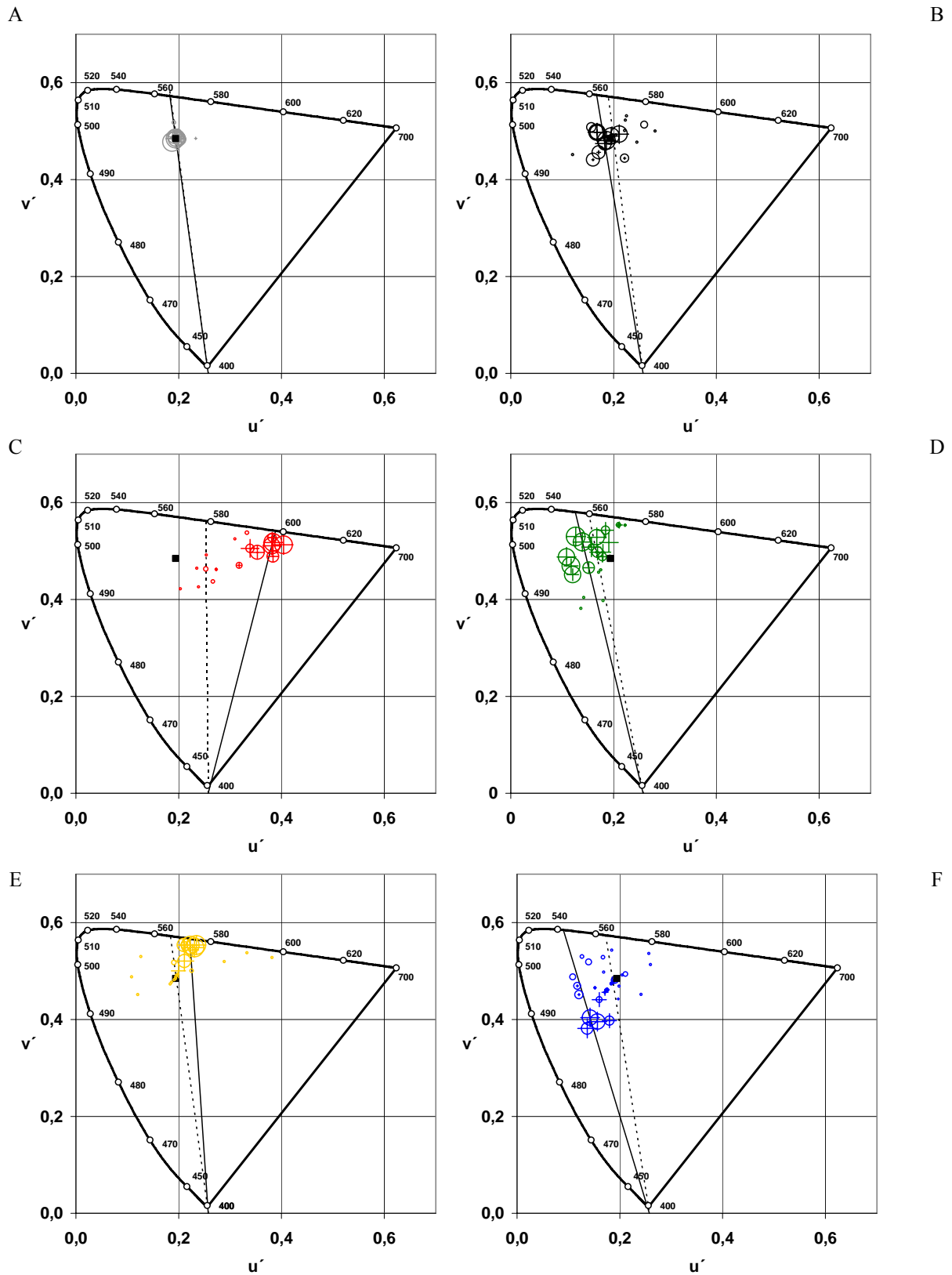
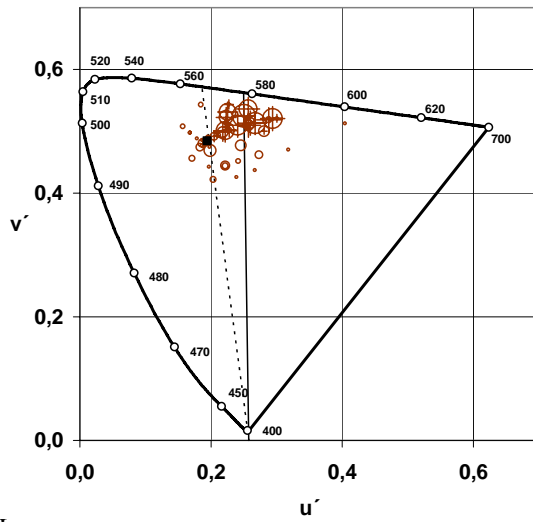
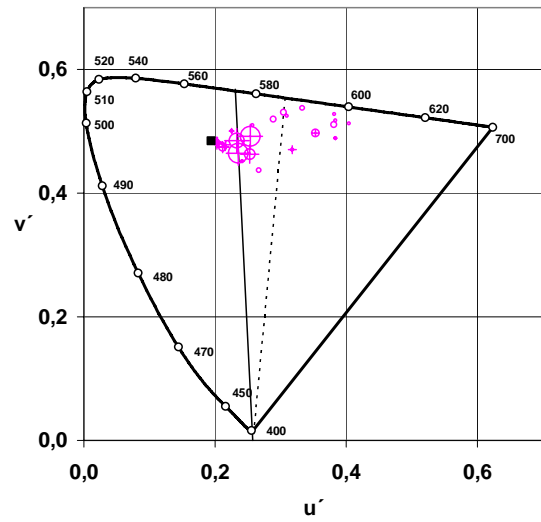


Figura 7.10. Estímulos seleccionados por tricrómatas normales y observadores mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Cruces: tricrómatas normales. Círculos: Mayores con defectos tritán. El resto de símbolos conserva el mismo significado que en la Figura 7.9. Las líneas que parten del punto de confusión tritanope tienen una pendiente igual a la mediana de la distribución de este parámetro para los aciertos (línea continua) y los errores (línea discontinua). La Figura 7.10 continúa en la página siguiente.

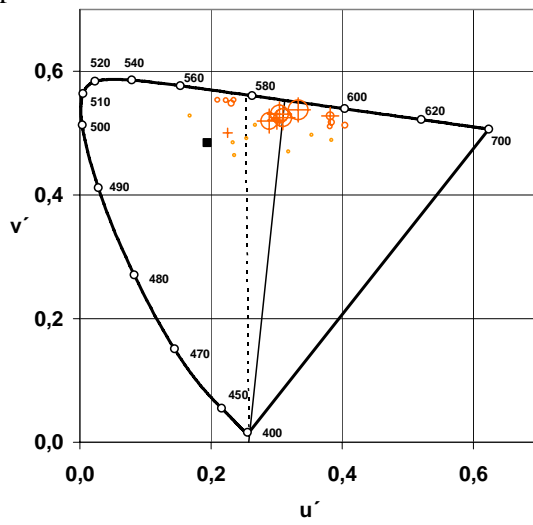
G



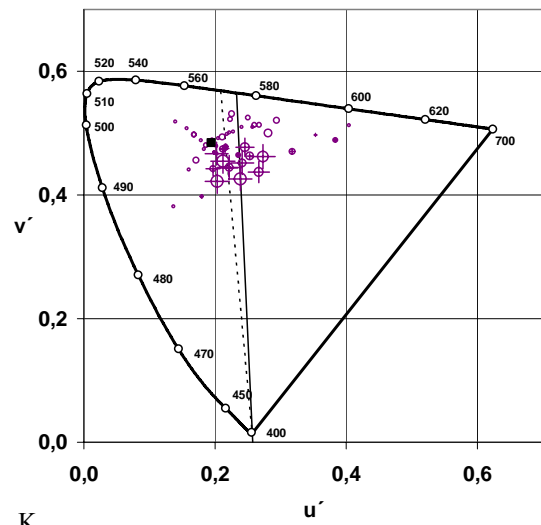
H



I



J



K

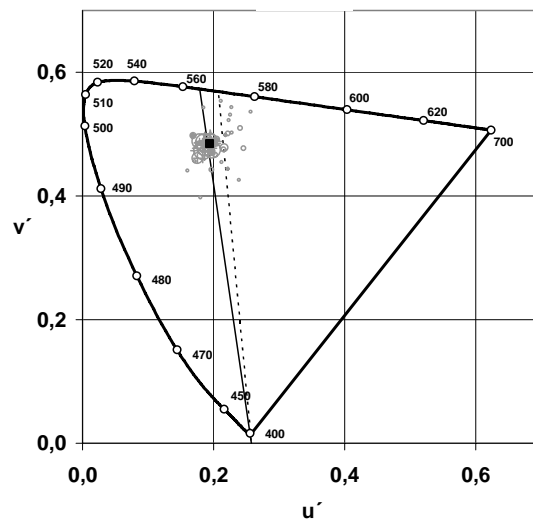


Figura 7.10. (Continuación).

3. **Cómputo de la claridad transformada (L^*_f) de acuerdo al filtrado prerretiniano.** A partir de los valores recomputados para el factor de luminancia de los estímulos (Y_f), se calcularon los valores de claridad asociados, empleando la expresión general de la CIE que permite computar la claridad, L^* , a partir del factor de luminancia, Y :

$$L^*_f = 116 \cdot \left(\frac{Y_f}{Y_{fn}} \right)^{1/3} - 16,$$

donde Y_{fn} es el factor de luminancia del blanco de referencia teniendo en cuenta el efecto del filtrado prerretiniano)¹.

Como se comentó en la introducción, la primera hipótesis o *hipótesis de predicción de errores basada en las líneas de confusión*, partía de una evidencia empírica recogida en diversos trabajos: los errores cometidos por personas envejecidas son de naturaleza tritán. Para evaluar esta hipótesis, se tomaron los datos obtenidos en la tarea de mapa de colores por el grupo de observadores que cometieron errores de este tipo en los tests, y se compararon (prueba estadística U de Mann-Whitney) las distribuciones de una variable derivada del parámetro a (pendiente tritanope) para aciertos y errores.

La razón por la cual no se empleó directamente la pendiente tritanope en el análisis de datos, es simplemente porque (a diferencia de lo que ocurriera con protanopes y deuteranopes) se viola la correspondencia ordinal entre el valor de dicho parámetro y la localización de las líneas tritanopes correspondientes en el diagrama de cromaticidad (obsérvese la Figura 7.10). Es decir, partiendo de 0°, y siguiendo el sentido contrario a las agujas del reloj, la función tangente toma valores en el orden: 1) valores positivos cada vez mayores y 2) valores negativos cada vez menores. Para respetar la relación ordinal mencionada, simplemente se substituyó en los análisis el valor de la pendiente de la línea tritán por el valor del ángulo correspondiente ($\alpha_t = \text{tg}^{-1} a_t$) expresado en el rango 0-180°. Por último, y puesto que la inspección visual de la Figura 7.10 revela que, para algunas categorías, los errores se extienden hacia los dos extremos delimitados por las líneas tritán de los aciertos, los análisis también se efectuaron con una nueva variable, el valor absoluto de la distancia angular entre los estímulos y el ángulo medio de los aciertos.

¹ Para todos los estímulos se cumplió la condición $Y_f/Y_{fn} > 8856$.

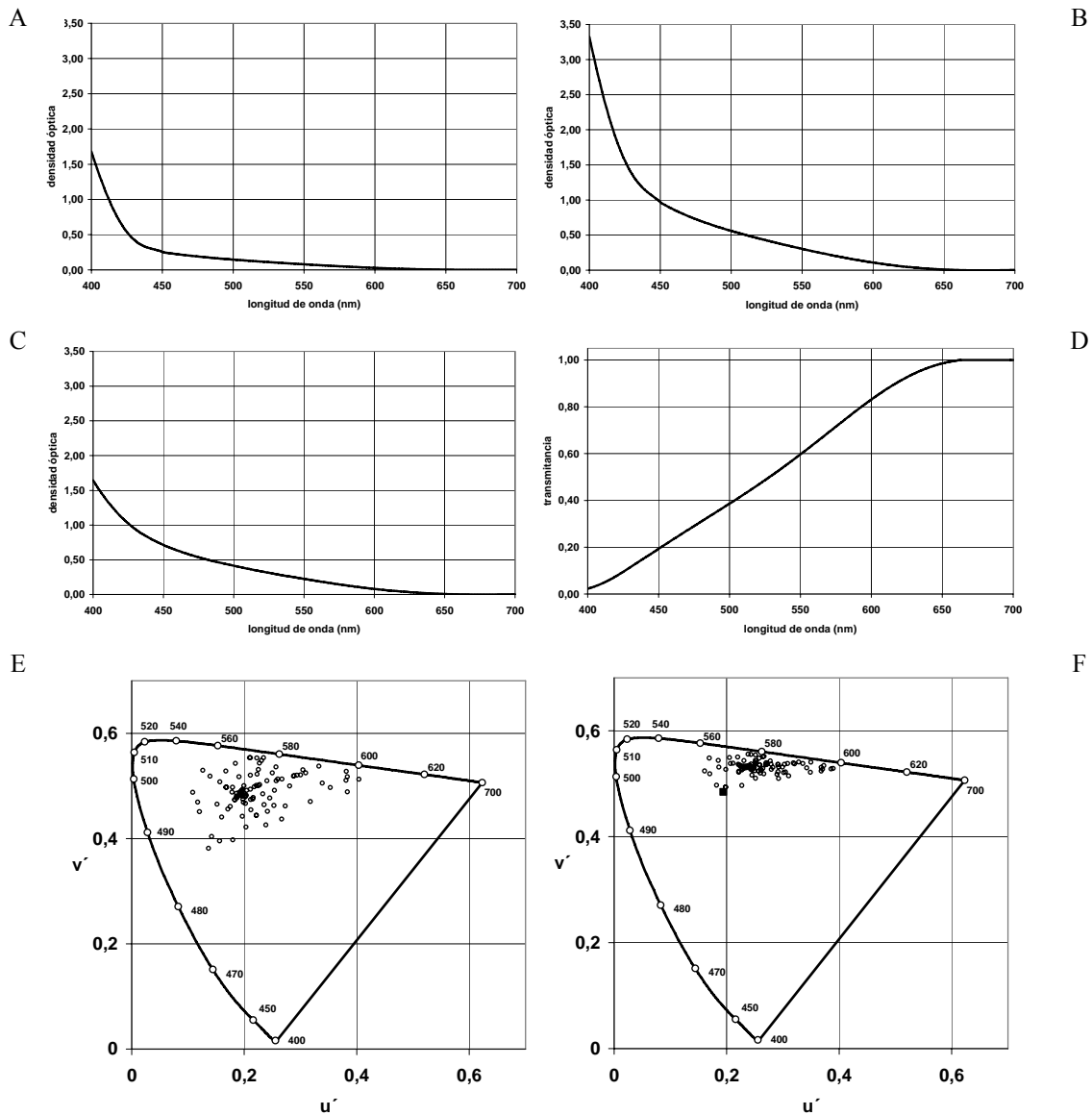


Figura 7.11. Cambios en la densidad óptica del cristalino asociados a la edad, y efecto sobre las coordenadas cromáticas de los estímulos empleados en la muestra. Se muestra la densidad óptica espectral correspondiente al cristalino joven (A: van Norren y Vos, 1974; 25 años, pupila pequeña), la correspondiente al cristalino envejecido (B: Pokorny, Smith, y Lutze, 1987, ecuación (27.2) tomando $A = 86,47$ años y previa multiplicación de la densidad óptica espectral del cristalino joven por 1,15 para ajustarla a la edad de 32 años como demanda la ecuación), la diferencia entre ambas (C), y la conversión de dicha diferencia a unidades de transmitancia (D). Esta función de transmitancia se empleó para simular el efecto que el filtrado prerretiniano extra, propio del cristalino envejecido, tiene sobre las coordenadas cromáticas de los estímulos empleados en la tarea de mapa de colores (E: coordenadas cromáticas estándar. F: coordenadas cromáticas tras el filtrado, de acuerdo a la ecuación (20)). Las coordenadas del punto acromático (cuadrado) se han mantenido constantes para facilitar la comparación.

La Tabla 7.22 resume los resultados obtenidos. Puede observarse que, para las categorías de *negro*, *rojo*, *amarillo*, *azul*, *marrón*, *rosa*, *naranja*, *morado*, y *gris*, existieron diferencias significativas ($p < 0,05$) en las distribuciones del valor absoluto de la distancia angular de aciertos y errores. Las únicas categorías cuyos aciertos y errores no se diferenciaron significativamente en sus distribuciones fueron *blanco* y *verde*.

Tabla 7.22. Resultados de los análisis efectuados para comparar las características colorimétricas de aciertos y errores cometidos por mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores. Se muestra la mediana de la distribución del ángulo (0-180°) asociado al parámetro a (pendiente de la línea de confusión) para los aciertos ($\alpha_{t,acs}$) y los errores ($\alpha_{t,ers}$), así como la mediana de la distribución del valor absoluto de la distancia angular para los aciertos ($|\alpha_{t,acs} - \bar{\alpha}_{t,acs}|$) y los errores ($|\alpha_{t,ers} - \bar{\alpha}_{t,ers}|$) (más detalles en el texto). U: valor del estadístico de contraste. Mediante asteriscos se muestran los contrastes estadísticamente significativos (también se indica el valor de la significación exacta, sig.). Entre paréntesis se muestra el número de aciertos o errores correspondiente.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
$\alpha_{t,acs}$	97,42 (87)	98,92 (105)	76,39 (78)	102,81 (124)	93,62 (73)	105,96 (59)	90,79 (129)	92,71 (57)	84,36 (50)	92,52 (70)	97,81 (100)
$\alpha_{t,ers}$	97,32 (5)	96,76 (22)	90,50 (12)	100,42 (8)	97,32 (16)	98,44 (32)	97,16 (62)	84,93 (19)	90,45 (25)	94,97 (48)	95,06 (36)
$\alpha_{t,acs} - \alpha_{t,ers}$	0,09	2,16	-14,11	2,39	-3,70	7,52	-6,37	7,77	-6,09	-2,45	2,76
U	191	892	11***	396	269***	290***	1368***	132***	530	1330	1097,5***
sig.	,652	,092	,000	,346	,000	,000	,000	,000	,286	,055	,000
$ \alpha_{t,acs} - \bar{\alpha}_{t,acs} $	0,33	1,54	1,53	3,12	1,14	1,98	2,34	1,53	1,79	3,27	0,80
$ \alpha_{t,ers} - \bar{\alpha}_{t,ers} $	0,15	3,56	13,41	2,93	4,50	6,43	6,12	6,25	8,91	5,03	3,06
$ \alpha_{t,acs} - \bar{\alpha}_{t,acs} - \alpha_{t,ers} - \bar{\alpha}_{t,ers} $	0,19	-2,02	-11,89	0,20	-3,37	-4,45	-3,78	-4,72	-7,12	-1,76	-2,26
U	139	449***	11***	420	118***	282***	1498***	150***	51***	1116**	514,5***
sig.	,182	,000	,000	,476	,000	,000	,000	,000	,000	,002	,000

*: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,05$).

**: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,01$).

***: contraste estadísticamente significativo (significación asintótica, $p < ,001$).

Tomando como variable dependiente del análisis el ángulo (0-180°) de las líneas tritán de aciertos y errores, las únicas diferencias con el patrón de resultados anterior es que para *negro*, *naranja* y *morado* no existen diferencias significativas (estos resultados fueron parcialmente presentados en el II Congreso Ibérico de Percepción: Lillo et al., 2007). Sin embargo, como se observa en la Figura 7.10 (B, I, J) los errores cometidos al buscar ejemplares de estas categorías se extienden hacia las cromaticidades situadas a ambos lados de los extremos de las líneas tritán correspondientes a los aciertos (lo que desvirtúa la validez de los resultados encontrados con la variable dependiente α).

Para evaluar la segunda hipótesis, que denominamos *hipótesis de predicción de errores basada en el filtrado prerretiniano sin compensación*, se emplearon las coordenadas cromáticas y la claridad computadas de acuerdo al filtrado prerretiniano extra asociado al envejecimiento del cristalino, u'_{jf} , v'_{jf} y L^*_{jf} . Para cada estímulo filtrado j , caracterizado por la terna u'_{jf} , v'_{jf} y L^*_{jf} , se determinó el estímulo más cercano (en distancia CIELUV) de entre todos los estímulos de la muestra sin filtrar. Para mantener la estructura empleada en dicrómatas, la formalización de esta hipótesis se llamará **Modelo C**. La Tabla 7.23 muestra la matriz de confusión derivada de efectuar dicho procedimiento.

Tabla 7.23. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores para cada TCB a partir del Modelo C de predicción de errores basado en el filtrado prerretiniano sin compensación. Nótese como a partir de estas predicciones, no se esperaría el uso de algunos TCBs como *blanco*, *azul*, *rosa* o *morado*.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	-											0,00
N		0,00				100						0,00
R			44,19					11,86	17,21	26,74		0,00
V				100								0,00
Am	25,29			19,98	29,61						23,88	1,24
Az						-						0,00
Mar		18,99		6,69		8,61	28,49			21,77	15,00	0,45
Ros								-				0,00
Nar			12,44		9,81		17,82	24,86	23,56	10,52		0,98
Mor										-		0,00
Gri						100					0,00	0,00

Lo primero que llama poderosamente la atención si se observa esta matriz de confusión, es que hay algunos TCBs, concretamente, *blanco*, *azul*, *rosa* y *morado*, que ni siquiera se esperaría fuesen utilizados. En otras palabras: una vez filtrados los estímulos, mediante el filtrado prerretiniano extra debido al envejecimiento del cristalino, ninguno de ellos cae cerca de estímulos que, sin filtrar, recibieran estas denominaciones por los TN jóvenes (las Figuras 7.10 y 7.11F ilustran muy bien este efecto para *azul* y *morado*).

Además, si se compara esta matriz de confusión con la que resume el comportamiento empírico de los mayores con defectos tritán (Tabla 7.15.2), es evidente una sobreestimación de los errores para todos los términos excepto *verde*. Por ejemplo, se esperaría que *negro* fuese empleado exclusivamente ante estímulos categorizados como *azules* por los TN jóvenes, o que *amarillo* se emplease ante estímulos categorizados como *blancos*, *grises* o *verdes* por dichos observadores.

Una vez ilustrada la absoluta incapacidad del Modelo C para predecir el comportamiento empírico de los mayores con defectos tritán, se procedió a evaluar la adecuación de la denominada *hipótesis de predicción de errores basada en el filtrado prerretiniano con reescalamiento de la respuesta de los conos*. La formalización de esta hipótesis se llamará **Modelo D**.

El Modelo D parte del cómputo de L, M y S, las respuestas de los tres tipos de cono ante los estímulos de la muestra, según

$$L = K_L \sum_{400}^{700} L_e(\lambda) L_2(\lambda) \Delta\lambda$$

$$M = K_M \sum_{400}^{700} L_e(\lambda) M_2(\lambda) \Delta\lambda$$

$$S = K_S \sum_{400}^{700} L_e(\lambda) S_2(\lambda) \Delta\lambda$$

donde $L_2(\lambda)$, $M_2(\lambda)$ y $S_2(\lambda)$ son los fundamentales de los conos según Stockman y Sharpe (2000), $L_e(\lambda)$ es la radiancia espectral de los estímulos de la muestra, y K_L , K_M y K_S son constantes que se ajustaron para reescalar la respuesta relativa de los tres tipos de conos, de manera que la relación L:M:S existente para el blanco de referencia fuese 1:1:1 (concretamente, se hizo que la respuesta de cada tipo de cono ante el blanco de referencia fuese igual a 100). A continuación se recomputaron los valores LMS de acuerdo a las expresiones

$$L_f = K_{Lf} \sum_{400}^{700} T(\lambda) L_e(\lambda) L_2(\lambda) \Delta\lambda$$

$$M_f = K_{Mf} \sum_{400}^{700} T(\lambda) L_e(\lambda) M_2(\lambda) \Delta\lambda$$

$$S_f = K_{Sf} \sum_{400}^{700} T(\lambda) L_e(\lambda) S_2(\lambda) \Delta\lambda$$

donde $T(\lambda)$ es el filtrado prerretiniano extra debido al envejecimiento del cristalino (véase la Figura 7.11D), y K_{Lf} , K_{Mf} y K_{Sf} son constantes que se ajustaron para reescalar la respuesta relativa de los tres tipos de conos de manera que la relación L:M:S existente para el blanco de referencia fuese exactamente igual a 1:1:1. (para ilustrar el efecto del filtrado sobre la respuesta de los conos, basta con tener en cuenta que la respuesta ante el blanco de referencia en L_f fue un 66,25% la de L , la de M_f un 56,71% de la de M , y la de S_f un 22,26% la de S).

Tabla 7.24. Predicciones sobre la distribución del porcentaje de aciertos y de errores en mayores con defectos tritán en la tarea de mapa de colores para cada TCB, a partir del Modelo D de predicción de errores basado en el filtrado prerretiniano con compensación.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	87,69							3,86			6,87	1,57
N		93,75				3,49						2,76
R			95,65							3,06		1,29
V				94,44	3,27							2,29
Am					98,02							1,98
Az	3,64			3,45		90,00						2,91
Mar							93,85					6,15
Ros								86,14		12,34		1,52
Nar			13,72				9,06		74,80			2,42
Mor				8,61		3,57		4,53		83,03		0,26
Gri	4,88										89,15	5,98

Una vez establecido el reescalamiento de forma que la ratio L:M:S fuese idéntica con y sin filtrado prerretiniano extra, para intentar simular el efecto de un proceso de adaptación a lo largo del ciclo vital (similar a una adaptación de tipo von Kries (Werner y Steele, 1988; Neitz et al., 2002), para cada estímulo filtrado j , caracterizado por la terna L_{ff} , M_{ff} y S_{ff} , se determinó el estímulo más cercano (en distancia LMS, con todos los inconvenientes que esta métrica pueda acarrear), de entre todos los estímulos de la muestra sin filtrar.

La Tabla 7.24 muestra la matriz de confusión derivada de efectuar dicho procedimiento. Una rápida comparación de la Tablas 7.24 y 7.15.2 permite constatar que la hipótesis del reescalamiento predice un comportamiento muchísimo más acertado del que los mayores con defectos tritán exhiben realmente a nivel empírico.

La Tabla 7.25 muestra la proporción de varianza explicada, en global y para cada TCB, por los Modelos C y D, así como el ΔR^2 que supone la aplicación del Modelo D sobre el C, para 1) mayores con defectos tritán y para 2) el subgrupo de mayores no afáquicos que pasaron los tests (para simular el envejecimiento del cristalino en este grupo se tomó $A = 81$, la edad media del grupo). Para ambos grupos, el Modelo D se ajusta mucho mejor a los datos, básicamente porque predice un mayor porcentaje de aciertos para todos los TCBs excepto para *verde*. Por último, la Tabla 7.26 detalla la proporción de varianza explicada por ambos modelos para observador. Puede observarse que el Modelo D se ajusta mucho mejor a los datos individuales, sobre todo para el grupo de observadores no afáquicos que pasaron los tests.

Tabla 7.25. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la distribución empírica del porcentaje de aciertos y errores de cada CCB, y las distribuciones derivada de las predicciones de los Modelos C y D. Las categorías se han dispuesto en orden descendente, para cada grupo de observadores mayores, según el valor de R^2 derivado de la aplicación del Modelo D.

Mayores no afáquicos que pasaron los tests				Mayores con defectos tipo tritán			
CCB	R^2	ΔR^2		CCB	R^2	ΔR^2	
	Modelo D	Modelo C			Modelo D	Modelo C	
V	1,00	1,00	,00	V	1,00	1,00	,00
Ros	1,00	-	-	Am	,99	,35	,64
R	,95	,75	,20	B	,98	-	-
Nar	,99	,25	,74	R	,97	,77	,21
N	,96	,02	,94	Gri	,96	,02	,94
Mor	,99	-	-	Nar	,96	,32	,63
Mar	1,00	,41	,59	N	,94	,00	,93
Gri	,98	,01	,97	Mar	,93	,61	,32
B	,99	-	-	Ros	,91	-	-
Az	,98	-	-	Mor	,75	-	-
Am	1,00	,33	,67	Az	,71	-	-
Promedio	,98	,39	,59	Promedio	,92	,44	,53
R^2 Matriz global	,97	,10	,87	R^2 Matriz global	,91	,14	,77

Tabla 7.26. Valores de R^2 obtenidos al calcular la relación lineal existente entre la matriz de confusión empírica de cada observador, y las matrices de confusión derivadas de las predicciones de los Modelos C y D. Los observadores se han dispuesto en orden descendente, dentro de cada grupo, según la magnitud del incremento en R^2 conseguido al emplear el Modelo D en lugar del Modelo C. Nótese que mientras que el grupo de observadores mayores con defectos tipo tritán está formado por el total de 15 observadores, sólo son ocho los observadores no afáquicos que pasaron los tests (los otros siete observadores que lo hicieron fueron afáquicos).

Mayores no afáquicos que pasaron los tests				Mayores con defectos tipo tritán			
Observador	ΔR^2	R^2		Observador	ΔR^2	R^2	
		Modelo C	Modelo D			Modelo C	Modelo D
PT2: FGL	,92	,03	,95	DT4: JSS	,93	,03	,96
PT14: EAG	,91	,02	,93	DT14: AOG	,91	,02	,93
PT6: CGA	,89	,05	,94	DT7: RM	,85	,03	,88
PT1: AG	,89	,04	,93	DT15: MB	,84	,04	,88
PT10: AAD	,89	,04	,93	DT11: AC	,82	,03	,85
PT15: CG	,86	,02	,88	DT5: RF	,79	,04	,83
PT12: ANA	,83	,03	,86	DT10: NC	,79	,02	,81
				DT6: CB	,74	,05	,79
				DT2: MA	,67	,03	,70
				DT12: PC	,64	,03	,67
				DT1: SA	,58	,03	,62
				DT3: FRM	,51	,02	,53
				DT13: MD	,44	,03	,47
				DT9: FB	,35	,03	,37
				DT8: GD	,34	,04	,38
Promedio	,88	,03	,92	Promedio	,68	,03	,71

Ninguna de las correlaciones calculadas entre el número de errores predicho y el obtenido empíricamente resultó estadísticamente significativa (Modelo C y mayores con defectos tritán: $R^2 = 0,01$, $F_{(1,9)} = 0,09$; Modelo C y mayores no afáquicos que pasaron los tests: $R^2 = 0,33$; $F_{(1,9)} = 4,53$; Modelo D y mayores con defectos tritán: $R^2 = 0,07$, $F_{(1,9)} = 0,645$; Modelo D y mayores no afáquicos que pasaron los tests $R^2 = 0,002$; $F_{(1,13)} = 0,02$).

Las pruebas estadísticas de bondad de ajuste de la distribución de aciertos y errores, mostraron el siguiente patrón:

- El Modelo C predice un comportamiento mucho más erróneo del registrado empíricamente para todas aquellas categorías para las que se pudo efectuar el análisis: *rojo*, *amarillo*, *marrón* y *naranja* ($p < 0,001$), para los dos grupos de observadores. Recuérdese que el modelo no predice las respuestas de *blanco*, *azul*, *rosa* y *morado*. Además, para *negro* y *gris* no predice acierto alguno, y para *verde* no predice ningún error.
- Para el grupo de mayores con defectos tritán, el Modelo D predice un comportamiento mucho más acertado del registrado empíricamente, para todas las categorías ($p < 0,001$) a excepción de la de *naranja*. Para el grupo de mayores no afáquicos que pasaron los tests, no se obtuvieron diferencias significativas entre la distribución teórica de aciertos y errores derivada del Modelo D y la obtenida empíricamente, para las categorías de *blanco*, *verde*, *amarillo*, *marrón*, *rosa*, *naranja* y *gris*. El Modelo D predice un comportamiento más acertado para las categorías de *negro*, *rojo* ($p < 0,001$), *azul* ($p < 0,01$) y *morado* ($p < 0,005$).

RESULTADOS: TAREA DE BÚSQUEDA DE MEJORES EJEMPLARES

Las Tablas 7.27.1 (mayores que pasaron los tests) y 7.27.2 (mayores con defectos tritán), muestran el porcentaje de aciertos y la distribución del porcentaje de errores cometidos en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares para cada TCB (tomando el criterio estricto o moda para definir un acierto).

Como era de esperar, y tal y como ocurriera en el caso de los dicrómatas, el **porcentaje de aciertos** (diagonal de las matrices) obtenido en **la tarea de prototipos** es **mayor** que el obtenido en la tarea de mapa de colores (con la única excepción de *gris* en el grupo de observadores mayores con defectos tritán). La prueba de Wilcoxon reveló que las diferencias fueron estadísticamente significativas tanto para los mayores que pasaron los tests (medianas: 100 vs. 87,01; $Z = -3,18$; $p < 0,001$) como para los que mostraron respuestas de tipo tritán (90,91 vs. 68,04; $Z = -3,35$; $p < 0,001$), así como para los datos agregados de ambos grupos (100 vs. 80,12; $Z = -4,62$; $p < 0,001$).

De la misma forma que ocurriera en la tarea de mapa de colores, **existieron diferencias estadísticamente significativas** entre los dos grupos de observadores mayores en el **porcentaje de aciertos** en la búsqueda de foci a nivel global (medianas: 100 vs 90,91; $U = 56$; $p = 0,05$). Comparando el rendimiento de los grupos **categoría por categoría** (Figura 7.12), se encontraron diferencias significativas para *azul* [$\chi^2_{(2,45)} = 8,78$, $p < 0,05$], *morado* y *gris* [$\chi^2_{(2,45)} = 13,07$, $p < 0,005$].

Mediante la aplicación de la prueba exacta de Fisher, se determinó que el grupo de observadores mayores con defectos tritán, cometió significativamente más errores que los otros dos grupos al buscar los mejores ejemplares de las tres categorías mencionadas (contrastes unilaterales): ***azul*** ($p < 0,05$), ***morado*** ($p < 0,05$ frente a TN jóvenes; $p < 0,005$ frente a los mayores que pasaron los tests) y ***gris*** ($p < 0,05$ frente a los mayores que pasaron los tests; $p < 0,05$ frente a los TN jóvenes). Sin embargo, entre los mayores que pasaron los tests y los TN jóvenes no existieron diferencias significativas.

Tabla 7.27.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		80,00				20,00						0,00
R			100									0,00
V				100								0,00
Am					100							0,00
Az						100						0,00
Mar		6,67					93,33					0,00
Ros								100				0,00
Nar									100			0,00
Mor										100		0,00
Gri				6,67							93,33	0,00

Tabla 7.27.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores mayores con defectos tritán en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	80,00				8,57						8,57	2,86
N		100										0,00
R			86,67						13,33			0,00
V				100								0,00
Am					100							0,00
Az				19,86		73,33	6,81					0,00
Mar				7,32			80,00			5,37	7,32	0,00
Ros			15,65					80,00	4,35			0,00
Nar			6,82		14,61				78,57			0,00
Mor		13,33	3,33	7,14		12,38		5,24	4,76	53,33		0,48
Gri				15,02		8,05		8,05		15,02	53,33	0,54

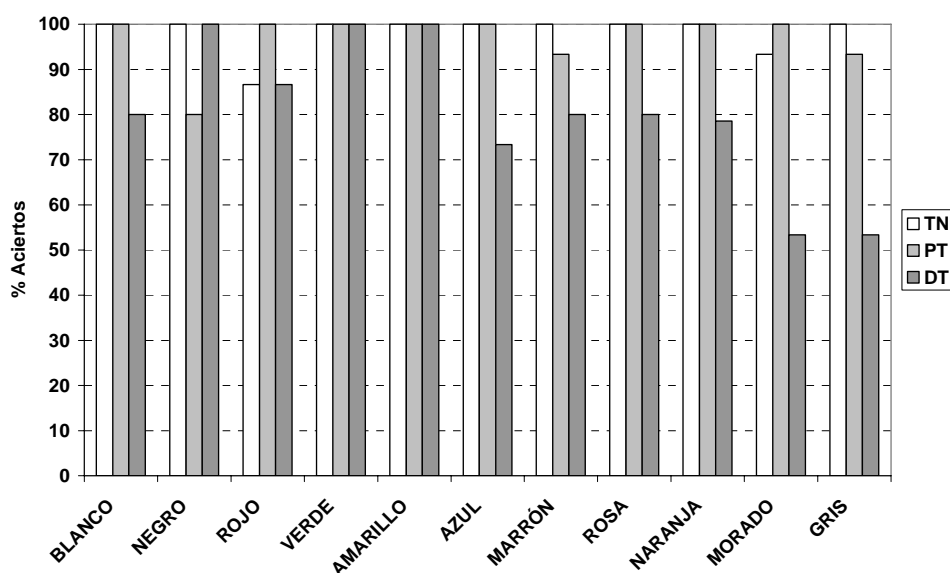


Figura 7.12. Porcentaje de aciertos en la tarea de búsqueda de foci para cada TCB. Barras de color blanco: tricrómatas normales jóvenes. Barras de color gris claro: mayores que pasaron los tests. Barras de color gris oscuro: mayores con defectos tritán (los datos para los grupos de observadores mayores se muestran en las diagonales de las Tablas 7.27.1 y 7.27.2).

El tipo de errores cometidos en la **tarea de búsqueda de foci** (Tablas 7.27.1 y 7.27.2) **concuerda notablemente** con los errores cometidos en la **tarea de mapa de colores** (Tablas 7.15.1 y 7.15.2): todos los tipos de error registrados en la primera tarea se registraron también en la segunda (con la única excepción del error *morado-naranja*, Tabla 7.27.2). Los errores cometidos por los observadores que pasaron los tests al buscar los mejores ejemplares, coincidieron con el error más frecuente de la tarea de mapa de colores: *negro-azul*, *marrón-negro* y *gris-verde*. En el grupo de mayores con defectos tritán, esto también ocurrió para los errores *blanco-rosa*, *rojo-naranja*, *azul-verde*, *marrón-morado*, *rosa-naranja*, *naranja-rojo*, y *morado-marrón*. Los errores *rosa-rojo*, *naranja-amarillo*, *morado-negro*, y *gris-verde* fueron el segundo error más frecuente en la tarea de mapa de colores.

Las Figuras 7.13 y 7.14 representan, en diferentes diagramas de cromaticidad $CIE_{u'v'}$ 1976, los estímulos seleccionados por los observadores mayores que pasaron los tests y los observadores mayores con defectos tritán, respectivamente, en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares (los cuadrados con fondo blanco representan aciertos, y los cuadrados sólidos, errores; el tamaño codifica la frecuencia de selección).

Para evaluar la relación **entre la ejecución mostrada en las tareas de mapa de colores y de búsqueda de mejores ejemplares**, se efectuaron los análisis de regresión pertinentes. La Figura 7.15 representa el porcentaje de acierto obtenido en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares en función del obtenido en la tarea de mapa de colores, tanto para los datos de todos los observadores mayores agregados (A), como por separado (B: observadores que pasaron los tests; C: observadores con defectos tipo tritán). La relación lineal entre ambas variables **resultó ser estadísticamente significativa para los datos agregados** ($R^2 = 0,667$, $F_{(1,28)} = 56,08$, $p < 0,001$), pero los análisis de regresión efectuados por separado para cada grupo, revelaron que **únicamente para el caso de los mayores con defectos tritán** la relación fue estadísticamente significativa ($R^2 = 0,738$, $F_{(1,13)} = 36,69$, $p < 0,001$), ya que **no hubo relación** entre el rendimiento de ambas tareas en el grupo de **mayores que pasaron los tests** ($R^2 = 0,01$, $F_{(1,13)} = 0,77$, $p = 0,786$).

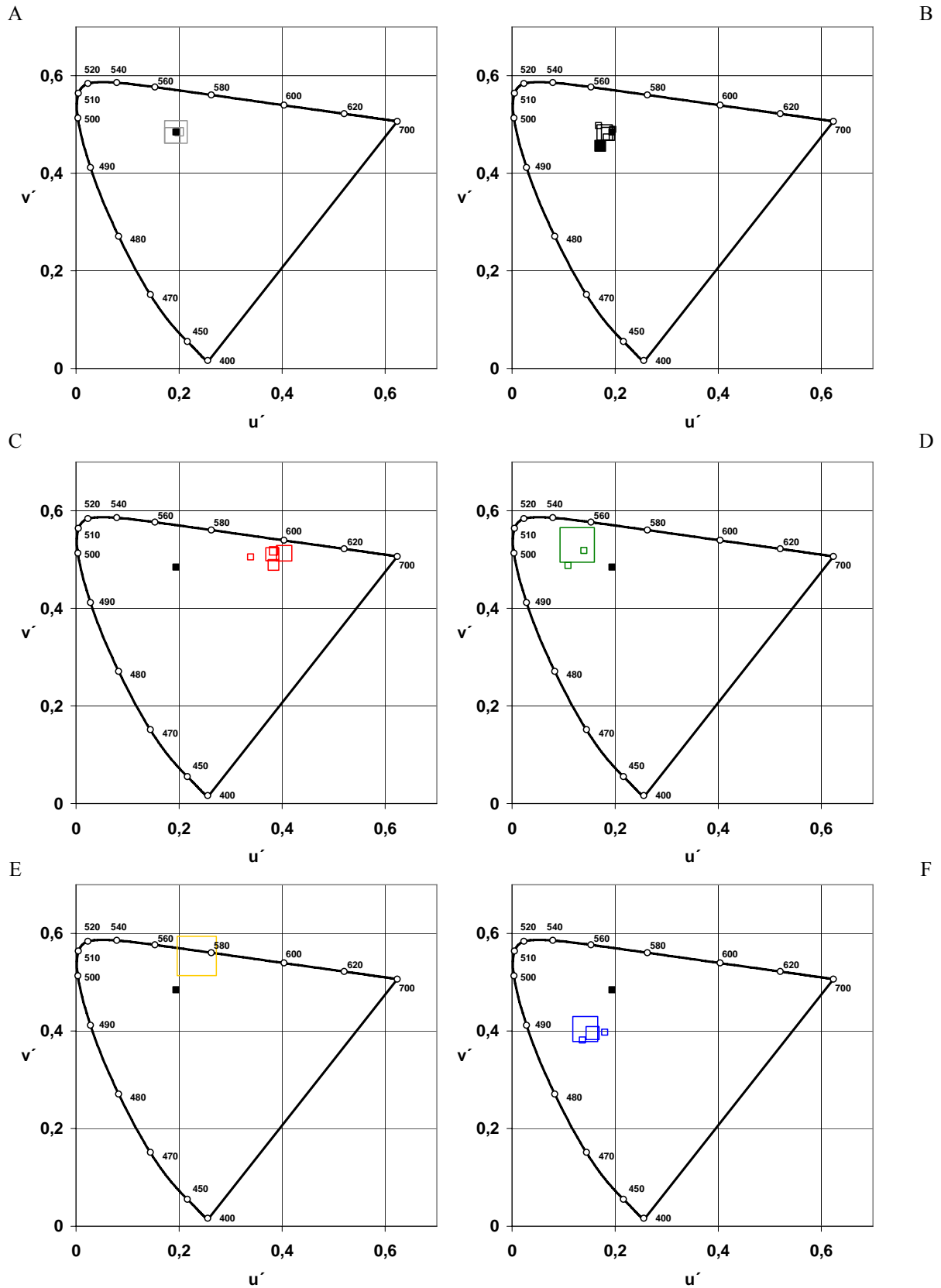


Figura 7.13. Estímulos seleccionados por los observadores mayores que pasaron los tests en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Se muestran los estímulos seleccionados correctamente (cuadrados con fondo blanco) y los errores (cuadrados sólidos). El tamaño codifica la frecuencia de selección. El resto de símbolos conserva el mismo significado que en la Figura 6.12. La Figura 7.13 continúa en la página siguiente.

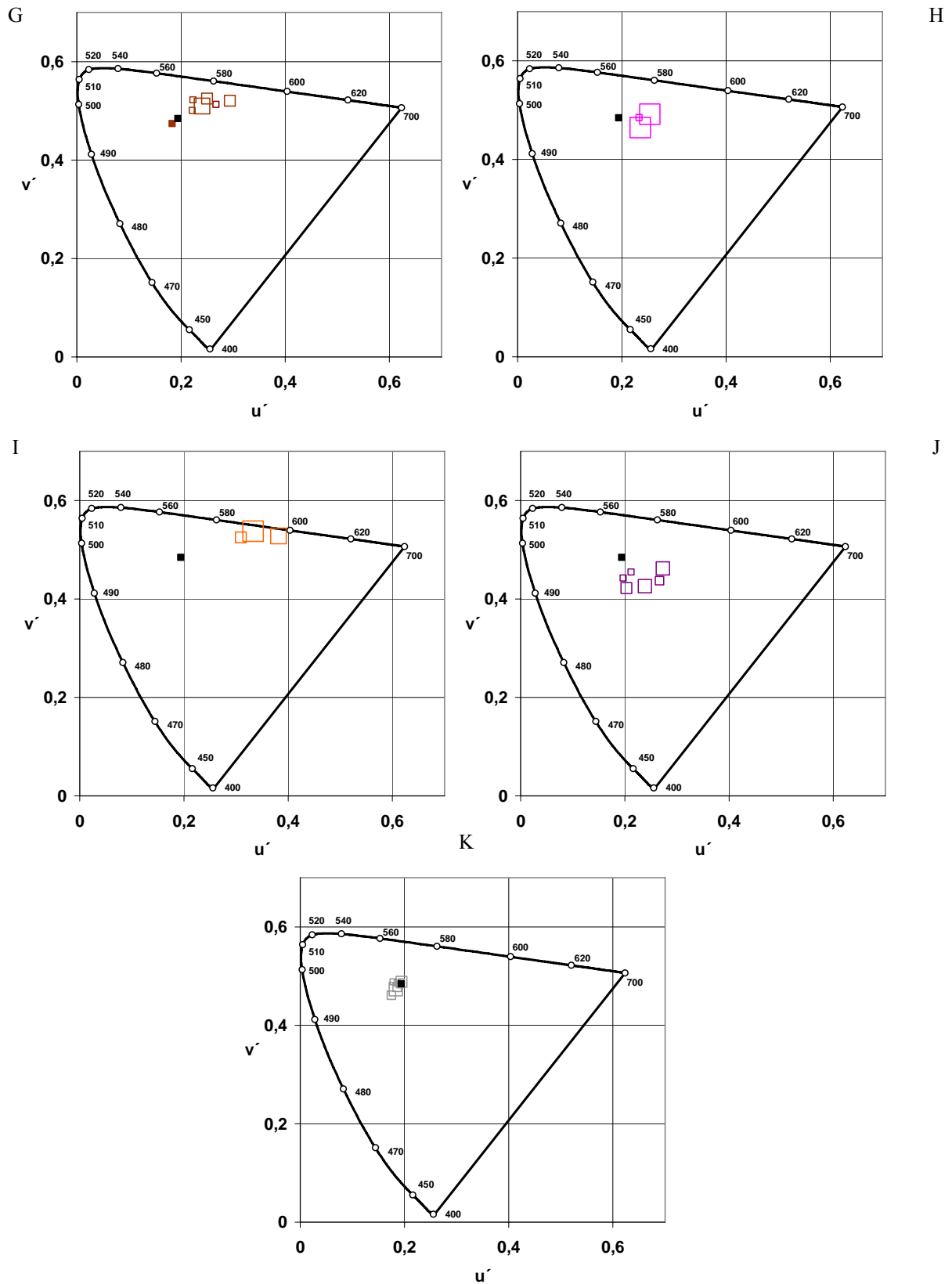


Figura 7.13. (Continuación).

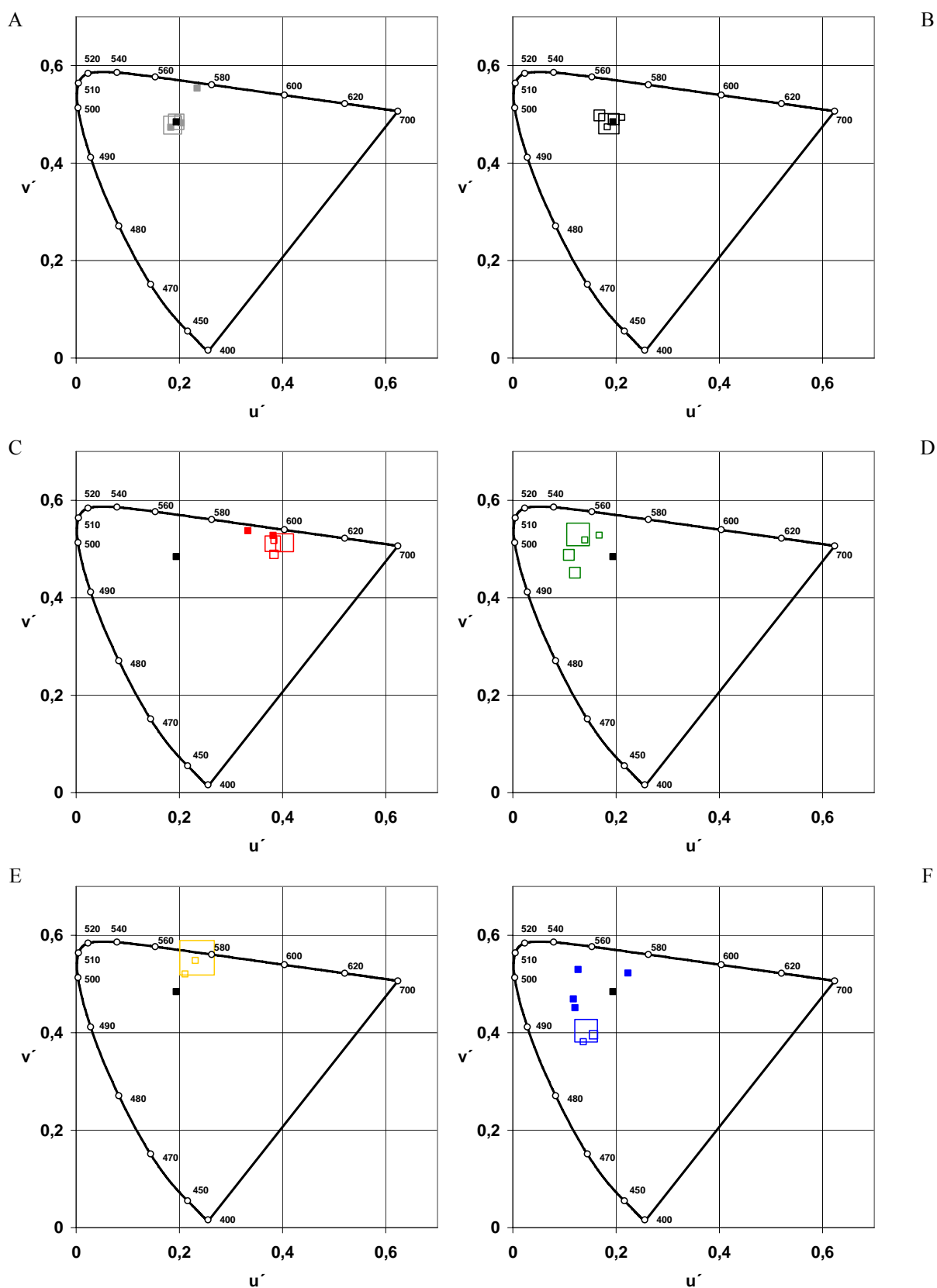
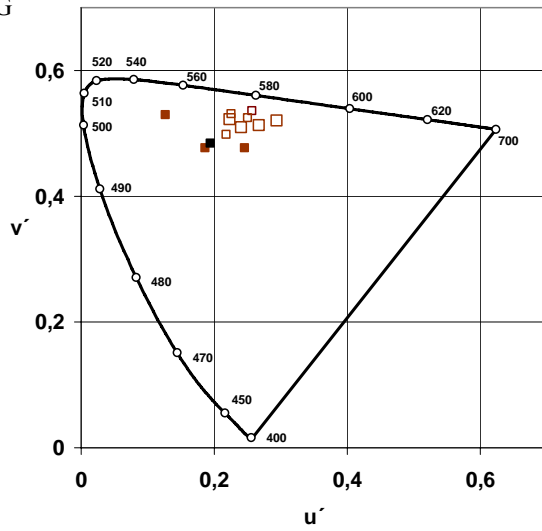
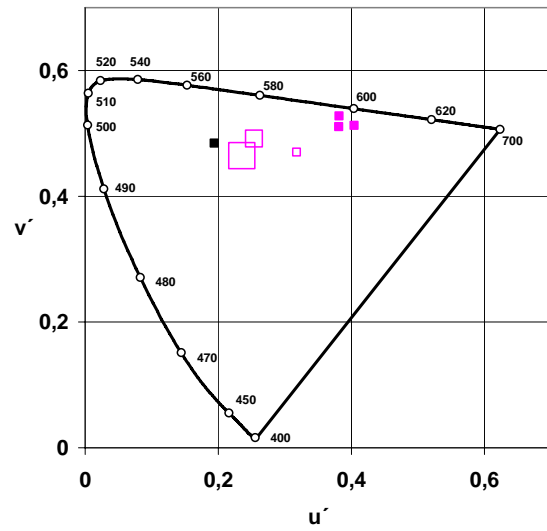


Figura 7.14. Estímulos seleccionados por los observadores mayores con defectos trítan en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. A: Blanco. B: Negro. C: Rojo. D: Verde. E: Amarillo. F: Azul. G: Marrón. H: Rosa. I: Naranja. J: Morado. K: Gris. Se muestran los estímulos seleccionados correctamente (cuadrados con fondo blanco) y los errores (cuadrados sólidos). Los símbolos conservan el mismo significado que en la Figura 7.13. La Figura 7.14 continúa en la página siguiente.

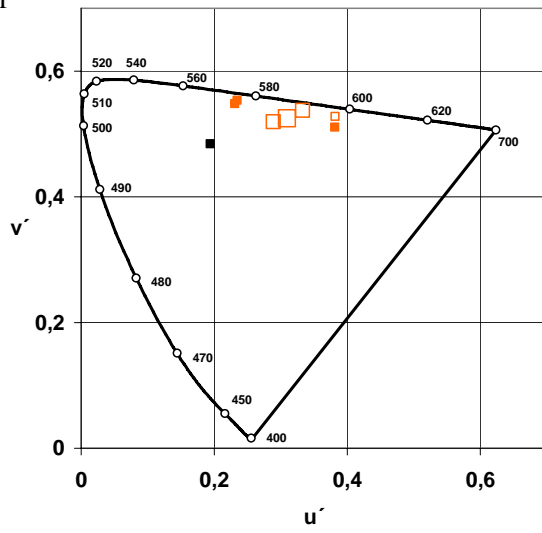
G



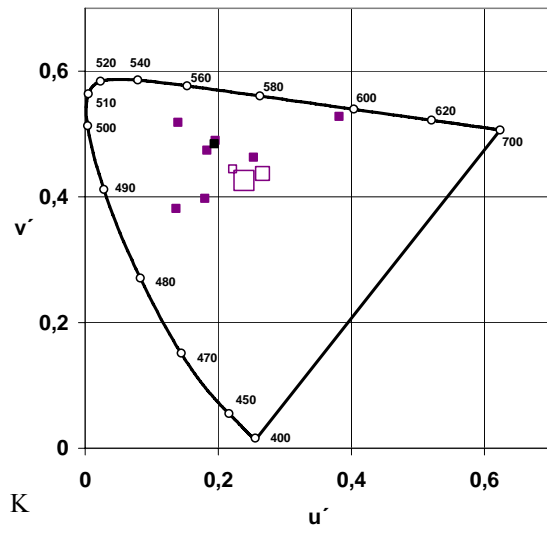
H



I



J



K

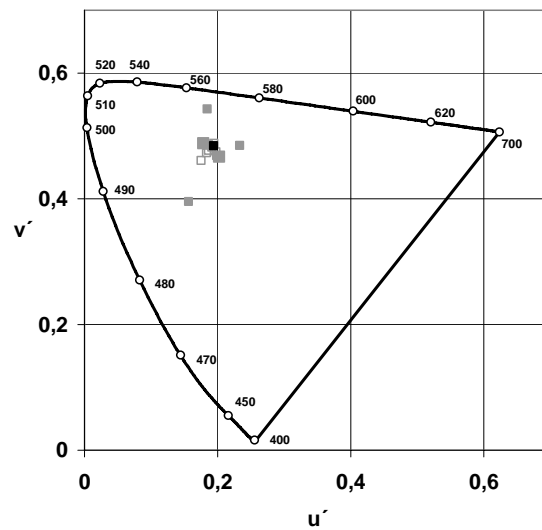


Figura 7.14. (Continuación).

Resulta altamente interesante poner en relación estos resultados con el trabajo de revisión realizado por Johnson y Choy (1987). Recuérdese que estos autores alertaron sobre la posibilidad de que, cuando se emplea la regresión lineal para describir el deterioro de una capacidad visual en función de la edad, se corre el riesgo de concluir que existe un deterioro gradual, enmascarando tal vez la existencia de un cambio abrupto. De forma análoga, la regresión efectuada sobre los datos agregados esconde una realidad bien distinta: mientras que el grupo de observadores que pasaron los tests no mostraron relación entre el rendimiento de ambas tareas, los observadores con defectos tritán sí que mostraron una fuerte relación. Es decir: para este grupo, ni siquiera la especificidad estimular de los prototipos asegura un comportamiento sea óptimo e independiente del exhibido en la tarea de mapa de colores. De hecho, el valor de la pendiente es prácticamente igual a 1 (Figura 7.15C).

Parece pues que en esta ocasión la tarea de búsqueda de mejores ejemplares sí resulta sensible a las diferencias individuales que también se recogen en la tarea de mapa de colores. De hecho, la relación lineal entre el valor de ΔR^2 que aporta el Modelo D sobre el Modelo C en la tarea de mapa de colores (Tabla 7.26), y el porcentaje de aciertos en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, resultó ser **estadísticamente significativa únicamente para el grupo de observadores mayores con defectos tritán** ($R^2 = 0,686$, $F_{(1,13)} = 28,45$, $p < 0,001$), pero no para los que pasaron los tests ($R^2 = 0,013$, $F_{(1,13)} = 0,172$, $p = 0,685$).

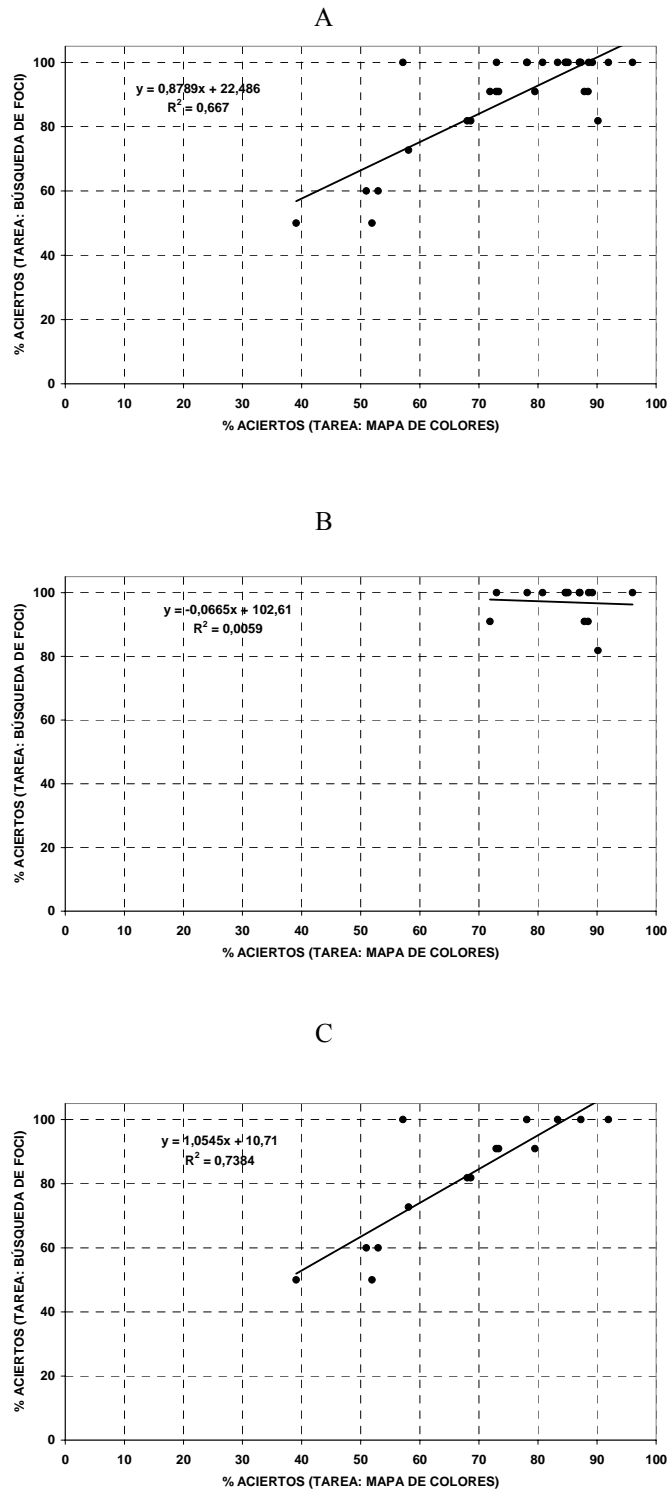


Figura 7.15. Relación entre el rendimiento obtenido por los observadores mayores en las dos tareas realizadas. Se representa el porcentaje de aciertos obtenido en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares en función del obtenido en la tarea de mapa de colores. La línea continua representa el ajuste lineal a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados (también se muestra la ecuación y el valor de R^2 correspondientes). A: Todos los observadores mayores. B: observadores mayores que pasaron los tests. C: observadores mayores con defectos tritán.

ESTUDIO 2: DISCUSIÓN

Los datos obtenidos con los observadores mayores, al igual que los registrados en dicrómatas, fueron sometidos a diferentes tipos de análisis con el objeto de obtener una visión lo más amplia posible del uso que estas personas hacen de los TCBs.

Debe tenerse presente que no se hizo ningún intento de prescindir de los datos de ningún participante, por lo que los datos aportados en esta tesis pueden interpretarse como característicos de un envejecimiento normal de la población, de forma que pueden estar incluidos casos incipientes de degeneración macular asociada a la edad, glaucoma, retinopatía diabética, o neuropatías ópticas. En palabras de Johnson y Choy (1987), en este estudio no se han empleado “*criterios estrictos de normalidad*”. Por esta misma razón, no se controló el efecto de la *miosis pupilar* (aunque recuérdese que los efectos de la absorción selectiva de las longitudes de onda tiene un efecto más acusado sobre la aparición de errores de tipo tritán que la reducción de la iluminación: Verriest, 1963)

A partir del estudio de las conexiones entre categorías y los resultados de los análisis MDS correspondientes, pueden establecerse dos conclusiones de un importante calado: En primer lugar, puede trazarse un claro declive en la importancia que el mecanismo cromático *amarillo-azul* tiene de cara a discriminar entre estímulos de diferentes categorías. Mientras que del MDS aplicado a los datos de TN jóvenes, emergen tres dimensiones etiquetables como *rojo-verde*, *amarillo-azul* y *claridad* (Figura 6.4), en los observadores mayores que pasaron los tests vuelven a emerger estas mismas dimensiones, con la gran diferencia de que la claridad precede a la dimensión *amarillo-azul* (Figura 7.1).

En segundo lugar, mientras que la solución tridimensional resulta muy adecuada para los observadores mayores que pasaron los tests, es la solución bidimensional la que parece serlo para los mayores que cometieron errores de tipo tritán. En ella se mantienen las dimensiones *rojo-verde* y *claridad*, quedando fuera la dimensión *amarillo-azul*.

Mediante el análisis colorimétrico de los errores, sin embargo, queda claro que intentar extrapolar el hecho de que los observadores mayores cometen errores de tipo tritán en los tests, al uso que hacen estos observadores de los TCBs, resulta ser, sin lugar a dudas, una inexactitud. Esta afirmación se deriva de los resultados de los análisis comparativos efectuados entre aciertos y errores, tomando las líneas de confusión tritanope como elemento de dicho análisis (Tabla 7.22). Puede rechazarse entonces la *hipótesis de predicción de errores basada en las líneas de confusión*. Este resultado es absolutamente comprensible: **no puede caracterizarse a los observadores mayores, aunque cometan errores de tipo tritán, como tritanopes.**

Para intentar profundizar con mayor éxito en los factores que subyacen al comportamiento exhibido por estos observadores, se desarrollaron los **Modelos C y D**, derivados a partir de a partir de las *hipótesis de predicción de errores basada en el filtrado prerretiniano, sin compensación* (Modelo C), o *con reescalamiento de la respuesta de los conos* (Modelo D).

Ambos modelos asumen el papel que el **envejecimiento del cristalino** tiene sobre la distribución espectral de los estímulos de color (Figura 7.11). Este papel se concreta recurriendo a la densidad óptica espectral propuesta por van Norren y Vos (1974) para un cristalino joven, y asumiendo un tamaño pequeño de la pupila (Norren y Vos, 1974; Wyszecki y Stiles, 1982, Tabla (1)2.4.6).

La razón que justifica la selección de este tamaño (recuérdese que el cristalino tiene un grosor mayor en el centro que en la periferia) se describe a continuación: aunque los niveles de iluminación no fueron muy elevados en la fase de recogida de datos (en torno a 200 lx), la *miosis senil* propia de la edad de los observadores es un factor que limita el tamaño de la pupila, como se ha descrito en el apartado 1.3.2.2. Puede consultarse en el trabajo de Winn, Whitaker, Elliot y Phillips (1994; consúltese la Figura 2 y las ecuaciones correspondientes) que dadas las condiciones de observación y la edad de los participantes, el tamaño del diámetro de la pupila de los mismos debió estar próximo a los 4 mm, mucho más cercano de los 3 mm, que de los 7 mm característicos de la pupila completamente dilatada que ante las mismas condiciones habrían mostrado observadores jóvenes.

El efecto de la edad sobre la densidad del cristalino se estimó empleando la ecuación aportada por Pokorny, Smith y Lutze (1987; Smith y Pokorny, 2003) para edades > 60 años, tomando $A = 86,47$ años para el grupo de observadores mayores con defectos tritán y $A = 81$ para el grupo de observadores mayores no afáquicos que pasaron los tests. Se recordará que según estos autores la aceleración en el amarillamiento del cristalino a partir de esta edad es característica de la población en general, y por tanto resulta plenamente aplicable a nuestros observadores puesto que no se excluyeron aquellos con principio de cataratas.

Por último, debe recordarse que la densidad óptica del cristalino sufre una gran variabilidad interindividual, incluso dentro de un mismo grupo de edad, lo que hace que sea inadecuado tanto 1) emplear el espectro de densidad estándar para corregir los datos de un solo observador (Wyszecki y Stiles, 1982), como 2) emplear las funciones propuestas para corregir los datos de un único observador en función de su edad (Werner, 1982; Pokorny, Smith y Lutze, 1987). Por esta razón, la aplicación de los modelos C y D a los datos grupales (Tabla 7.25), puede resultar más adecuada que su aplicación a los datos individuales (Tabla 7.26).

Sin embargo, como quedó claro en la parte teórica, parece claro que el sistema visual compensa los efectos del aumento de la densidad del cristalino, al menos hasta un límite (evidentemente ya se argumentó que es imposible compensarlos con exactitud: Kraft y Werner, 1994, p. 1220). Siguiendo la hipótesis lanzada por Werner y Steele (1988) sobre el reescalamiento del peso relativo de los conos para que su respuesta siga siendo equivalente ante un estímulo equienergético, lo cual aseguraría en gran medida la constancia del color a lo largo del ciclo vital, se desarrolló el Modelo D, concretado en las ecuaciones especificadas.

Por supuesto, las formalizaciones de las hipótesis que han llevado a formular los Modelos C y D tienen que ser evaluadas teniendo en cuenta ciertas limitaciones:

1. Debido a las **condiciones de observación** (consúltese el *método*), fundamentalmente a que los datos se registraron en diferentes residencias y centros de día de la tercera edad, y no en un laboratorio, la distribución espectral de la iluminación no estuvo perfectamente controlada, lo que hace que la

distribución de radiancia espectral, $L_e(\lambda)$, de los estímulos, no sea constante a través de las diferentes tomas de datos. Evidentemente, esto supone que la estimación de las respuestas de los conos mediante las ecuaciones correspondientes sea únicamente una aproximación a las respuestas reales.

2. En el cómputo de la claridad transformada de acuerdo al filtrado prerretiniano (L^*_f), se ha asumido que los cambios del factor de luminancia debidos al filtrado, deben reflejarse en el cómputo de la claridad transformada. Sin embargo, los trabajos de Sagawa y Takahashi (2001) y de Kraft y Werner (1994), comentados en la parte teórica, indicaban que mientras la función de eficiencia espectral determinada mediante FHF (y consiguientemente nuestro cómputo de Y_f), manifestaba un cambio acorde con el incremento de la densidad del cristalino, la función de sensibilidad determinada según el método de IHB sufrió cambios menores. Es decir, parece que a lo largo del ciclo vital, la percepción del brillo no se ve tan deteriorada como la sensibilidad espectral determinada mediante FHF. Es de esperar que con la percepción de la claridad ocurra algo similar. Por tanto, la validez del cómputo propuesto para determinar la claridad transformada, debería ser objeto de investigaciones futuras.
3. La **métrica** empleada al “*buscar la muestra más cercana*” en el Modelo D se basa en las respuestas LMS. Como se comentará más adelante, podría resultar mucho más adecuado combinar la respuesta de los conos en canales oponentes, y tener en cuenta las pruebas experimentales suficientemente contrastadas de reducción de la discriminación cromática en observadores mayores (consúltese al apartado 1.3.2.2).

Las predicciones de los Modelos C y D, se compararon con los datos obtenidos de dos grupos de observadores: los observadores con defectos tritán (únicamente 2 de los 15 eran afáquicos), y los observadores no afáquicos que pasaron los tests (7 del total de 15). La razón es evidente: para los observadores afáquicos carece de sentido filtrar los estímulos por un cristalino inexistente.

De la confrontación de las predicciones de los Modelos C y D con los datos, pueden establecerse las siguientes conclusiones:

1. Respecto a las matrices de confusión que expresan el porcentaje de aciertos y la distribución del porcentaje de errores de cada TCB (Tabla 7.15.2) las predicciones del Modelos C (Tabla 7.23) resultan absolutamente inadecuadas, tanto a nivel grupal (Tabla 7.25) como a nivel individual (Tabla 7.26), con la única y notable excepción del TCB *verde*. Por su parte, el Modelo D, que predice un comportamiento mucho más acertado, parece ajustarse mucho mejor a los datos, especialmente a los de los observadores no afáquicos que pasaron los tests, tanto a nivel grupal (Tabla 7.25) como a nivel individual (Tabla 7.26).
2. Respecto a la predicción del número de errores en función de los distintos TCB, la incapacidad de los dos modelos es más que manifiesta, aunque hay que recalcar que, como muestran las pruebas de bondad de ajuste, mientras que los desajustes del Modelo C son mucho mayores, los desajustes del Modelo D provienen fundamentalmente de la infraestimación de los errores cometidos para *negro, rojo, morado y azul*.

Así pues, el Modelo D se ajusta mucho mejor a los datos, al menos en parte, aportando evidencias a favor de la compensación del sistema visual a lo largo del ciclo vital. Sin embargo, los desajustes que muestra, conjuntamente con los resultados que se describen en la literatura especializada, ofrecen una clara hoja de ruta para perfeccionar el comportamiento de dicho modelo. A continuación se enumeran algunos factores que no han sido tenidos en cuenta, y que podrían explicar algunos de los errores cometidos:

1. Existe una clara evidencia experimental (consúltese Scheffrin, Shinomori y Werner, 1995: Figura 3.9 en esta tesis; Shinomori, Scheffrin y Werner, 2001) sobre el hecho de que en personas mayores, la discriminación basada en la actividad diferencial de los conos S requiere niveles de intensidad elevados, debido a la existencia de un mayor nivel de ruido neural en estos observadores. Como consecuencia, en condiciones naturales de observación y a bajos niveles de iluminación es de esperar que, sobre todo cuando la intervención del mecanismo cromático mediado por los conos S sea crucial, se comentan errores en la categorización del color. Comentaremos dos hechos importantes que serían plenamente congruentes con esta forma de proceder.
 - a. En primer lugar, como ya se comentó a la luz de los resultados del análisis MDS, las categorías de *marrón* y *morado*, muy alejadas en la

solución de los TN jóvenes, se aproximan algo para los mayores que pasaron los tests (Figura 7.1), y prácticamente colapsan en el caso de los mayores con defectos tritán (Figura 7.2B). De forma análoga, en este último grupo de observadores, los errores entre estas categorías son muy abundantes (Tabla 7.15.2 y Figuras 7.10G y 7.10J), pero no aparecen en los mayores que pasaron los tests (Tabla 7.15.1 y Figuras 7.9G y 7.9J). Puesto que muchos ejemplares de *marrón* y *morado* caen próximos a líneas tritán, y son de baja claridad, es posible que el ruido afecta a la discriminación entre estas categorías en los mayores con defectos tritán.

- b. El Modelo D infraestima con mucho los errores cometidos con el TCB *negro*. A partir del cómputo de las respuestas LMS, se simuló el efecto de diferentes niveles de ruido para los conos S, y como consecuencia apareció claramente un comportamiento para el TCB negro mucho más acorde a los datos: el ruido simulado hace que aparezcan errores con verde, azul, marrón, morado y gris, tal y como de hecho ocurrió empíricamente, y tanto en los mayores que pasaron los tests (Tabla 7.15.1) como en aquellos que mostraron defectos tritán (Tabla 7.15.1).
2. Además, parece que la discriminación cromática mediada por el canal oponente L/M requiere de umbrales diferenciales mayores que en personas jóvenes, en otras palabras, la discriminación cromática *rojo-verde* también se ve afectada con la edad. Este aspecto también podría ser considerado en futuros desarrollos del modelo D (por ejemplo, en los datos aparecen errores extendiéndose más allá de las líneas tritán para *negro* o *naranja*).

Además de estas, existen otras variables como por ejemplo la fluorescencia lenticular (Wyszecky y Stiles, 1982) cuyo efecto sobre la categorización del color no está adecuadamente estudiado.

Los análisis efectuados sobre la variable **frecuencia de selección**, mostraron que los dos grupos de observadores mayores no se diferenciaron en el número de estímulos seleccionados para ninguno de los TCBs. Este resultado contrasta ampliamente con los resultados de los análisis comparativos efectuados sobre el **porcentaje de errores** (Figura 7.5), que mostraron que, además de existir diferencias a nivel global, los

mayores con defectos tritán cometieron significativamente más errores que los que pasaron los tests para *negro*, *azul*, *marrón*, *naranja*, *morado* y *gris*.

De forma congruente, los análisis efectuados sobre la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, muestran que a nivel global también existieron diferencias estadísticamente significativas en la misma dirección. Además, las diferencias encontradas para *azul*, *morado*, y *gris*, también se mantuvieron en la tarea de búsqueda de foci. En dicha tarea, como ocurriera en el caso de los dicrómatas, aunque el tipo de errores cometidos fue muy similar al de la tarea de mapa de colores, el rendimiento de ambos grupos de observadores mayores fue muy superior al exhibido en esta última.

Por último, y como puede observarse en la Figura 7.15, el grupo de observadores **mayores con defectos tritán** mostró un **comportamiento inédito** en el resto de los grupos evaluados: existió una **relación lineal significativa entre el rendimiento mostrado en ambas tareas**, relación que interpretamos de la siguiente manera: este grupo fue el único para el que la tarea de búsqueda de mejores ejemplares resultó sensible a las diferencias individuales de sus integrantes.

2.4. CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES

El objetivo principal de esta tesis ha sido el estudio del uso de los TCBs en tres tipos de observadores: protanopes, deuteranopes y personas mayores con defectos tritán. Este objetivo se ha desglosado en otros tres más específicos: (1) delimitar las partes del espacio de color en las que cada tipo de observador utiliza los diferentes TCBs (nivel *descriptivo*); (2) comparar la delimitación efectuada por daltónicos dicrómatas, y observadores mayores con y sin defectos tritán, con la realizada por tricrómatas normales (nivel *comparativo*); (3) y evaluar la validez de diferentes hipótesis relativas al uso de TCBs, tanto en dicrómatas como en personas envejecidas, comparando las predicciones derivadas de dichas hipótesis con los datos empíricos obtenidos (nivel *explicativo*).

Para poder llevar a cabo los objetivos mencionados, el diseño de esta investigación ha estado marcado por las siguientes características básicas, que en nuestra opinión permiten la superación de muchas de las limitaciones propias de trabajos previos: (1) El muestreo de los estímulos utilizados, basado en investigaciones previas, ha asegurado la inclusión de buenos y malos ejemplares de todas las CCBs, (incluyendo las categorías acromáticas y asegurando la representación de diferentes grados de saturación). (2) Cada observador ha efectuado dos tareas: mapa de colores y búsqueda de colores focales, lo que ha permitido analizar por separado, y posteriormente comparar explícitamente, el rendimiento exhibido en cada una de ellas. (3) Se han incluido, sin ninguna excepción, la totalidad de las once CCBs (no sólo a nivel de representación estimular, sino también como objeto de análisis). (4) Se han incluido los dos tipos de daltónicos dicrómatas, y dos grupos de observadores de la tercera edad (los que pasaron los tests y los que cometieron errores de tipo tritán). (5) El análisis de los datos se ha llevado a cabo desde diferentes ópticas (desde la utilización del MDS, una técnica de análisis multivariante, hasta el análisis colorimétrico de los errores), con el objeto de aportar información sobre las conexiones existentes entre categorías, la naturaleza y el grado de los errores cometidos, y la adecuación de diferentes modelos de predicción de dichos errores.

En relación con los objetivos específicos de esta tesis, y a la luz de los resultados obtenidos, podemos extraer las siguientes conclusiones de carácter general:

1. Esta tesis ofrece **matrices de confusión empíricas**, que informan tanto del porcentaje de aciertos, como de la naturaleza y el grado de los errores cometidos en función de los diferentes TCBs. Además, lo hace tanto para la tarea de mapa de colores como para la tarea de búsqueda de mejores ejemplares.
 - 1.1. Esta información tiene una clara **utilidad aplicada**: puede emplearse como guía en el diseño de materiales cromáticos por personas que no sean expertas en alteraciones de la percepción del color, por ejemplo con el objeto de minimizar la probabilidad de error cuando daltónicos dicrómatas o personas mayores sean usuarios potenciales de dichos materiales. Esta línea de actuación sintoniza perfectamente con los principios del denominado diseño universal y de usabilidad.
 - 1.2. Por supuesto, hay que ser consciente en todo momento de las **condiciones de observación** bajo las cuales se efectuaron las tareas. Como consecuencia, si se desea saber el tipo de confusiones que pueden cometer protanopes o deuteranopes ante estímulos de color de pequeño tamaño ($\leq 2^\circ$), será mucho más acertado seguir un criterio más conservador, ya que ante este tipo de estímulos no se exhibe discriminación residual *rojo-verde*. En tal caso, resultarán de mucha mayor utilidad las matrices de confusión teóricas derivadas a partir de la aplicación del denominado Modelo A (consúltese el apartado *Futuras líneas de investigación*).
2. La aplicación del **MDS** a la información extraída sobre las **conexiones** entre categorías, se ha revelado como una excelente estrategia para comparar los mapas de color de diferentes grupos de observadores. En concreto:
 - 2.1. De las soluciones MDS derivadas de los datos de **TN jóvenes** y los observadores **mayores que pasaron los tests**, emergen **tres dimensiones**, claramente interpretables en términos de los dos mecanismos cromáticos, *rojo-verde* y *amarillo-azul*, y la dimensión acromática *claridad*. Sin embargo, mientras que este es el orden preciso en el que las dimensiones aparecen en la solución de los TN jóvenes, la dimensión ***amarillo-azul*** queda relegada al **tercer lugar en el caso de los observadores mayores**.

- 2.2. Las soluciones que mejor parecen ajustarse a los datos de **daltónicos dicrómatas** y **mayores con defectos tritán** son, por el contrario, **bidimensionales**. En ambos casos, la segunda dimensión es claramente interpretable en términos de *claridad*. Aunque la primera dimensión en protanopes y deuteranopes recuerda la actividad del mecanismo *amarillo-azul*, no parece totalmente reductible a este. Por su parte, la primera dimensión en mayores con defectos tritán parece interpretable en términos del mecanismo *rojo-verde*.
3. La comparación entre los resultados obtenidos en las **dos tareas** realizadas, reveló el siguiente patrón de resultados:
- 3.1. Las **comparaciones intragrupales** mostraron que el **rendimiento** obtenido en la tarea de **búsqueda de mejores ejemplares** fue significativamente **superior** al obtenido en la tarea de mapa de colores.
- 3.2. Las **comparaciones intergrupales** a nivel global ofrecen el mismo resultado **independientemente de la tarea**: entre protanopes y deuteranopes no existieron diferencias significativas a nivel global en ninguna de las dos tareas. Como contraposición, los observadores mayores con defectos tritán cometieron significativamente más errores que los observadores mayores que pasaron los tests en ambas tareas.
- 3.3. Existió un **gran parecido entre la naturaleza de los errores** cometidos en ambas tareas.
- 3.4. En **protanopes, deuteranopes** y observadores **mayores que pasaron los tests**, **no existió relación entre los resultados** obtenidos en la tarea de mapa de colores y la tarea de búsqueda de mejores ejemplares. Este resultado recalca lo erróneo que puede llegar a ser extrapolar los resultados de aquellos experimentos en los que únicamente se ha presentado (y/o analizado) un tipo de estímulos, a otro tipo de estímulos diferentes.
- 3.5. El único grupo para el que existió una clara relación (y **estadísticamente significativa**) entre el rendimiento en ambas tareas, fue para el que estaba formado por los observadores **mayores con defectos tritán**. Es decir, este es el único grupo para el que la especificidad estimular de los prototipos no resulta suficiente como para evitar que se cometan frecuentes errores, si también se cometen en la tarea de mapa de colores.

4. A nivel *explicativo*, el uso de **líneas de confusión** para predecir el comportamiento erróneo cuando se emplean TCBs, debe efectuarse con mucha precaución, puesto que resulta ser **inexacto**:

4.1. En daltónicos dicrómatas, existen fundamentalmente dos motivos que justifican esta afirmación.

- En primer lugar, hay ocasiones en las que **la propia naturaleza de los estímulos de superficie**, imposibilita que las distribuciones de las líneas de confusión de aciertos y errores sean iguales, como se observa muy bien para *amarillo* y *azul* (Figuras 6.12E-F y 6.13E-F).
- En segundo lugar, incluso para aquellas categorías para las que las distribuciones de las líneas de confusión de aciertos y errores no se diferencian, los datos son compatibles con la existencia de **discriminación residual rojo-verde**, es decir: los estímulos localizados a lo largo de una misma línea de confusión no son metaméricos (para las condiciones de observación empleadas), aunque tengan la misma claridad para el tipo de dicrómata considerado (obsérvese la Figura 6.17).

4.2. En mayores con defectos de tipo tritán, el desajuste es aún mayor, y también existen fundamentalmente dos motivos para ello:

- El aumento en la densidad óptica del cristalino afecta a la distribución espectral de los estímulos de color, debido a la **absorción selectiva de longitudes de onda corta** (y media, obsérvese la Figura 7.11), lo que, aunque produzca errores de tipo tritán (errores que como ya mostrara Verriest, 1963, pueden mimetizarse en observadores jóvenes llevando los filtros amarillentos adecuados), **en ningún modo es equivalente a la ausencia de los conos S** (en otras palabras, estos observadores no son “-anopes”, sino anómalos).
- Los datos revelan confusiones que se extienden más allá de los límites establecidos por las líneas de confusión, asemejándose a las características de los **errores de tipo rojo-verde**. Este tipo de errores puede derivar de una pérdida de discriminación cromática en este mecanismo, pero en parte es, nuevamente, una consecuencia lógica del filtrado extra del cristalino envejecido.

Profundizando en el nivel explicativo, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

5. Protanopes y deuteranopes.

5.1. En esta tesis se han desarrollado dos modelos de predicción de errores en el uso de TCB por parte de daltónicos dicrómatas: el **Modelo A** (de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada), y el **Modelo B** (de predicción de errores basado en líneas de confusión y claridad transformada, incluyendo discriminación residual *rojo-verde*). Estos modelos pueden encuadrarse, respectivamente, en las que hemos denominado tradición de Jameson y Hurvich (1978), y tradición de Boynton y Scheibner (1967). Ambos modelos suponen una evolución del que aquí hemos denominado Modelo equiprobable (Lillo, Davies et al., 2001).

5.2. Ambos modelos encuentran un apoyo sólido en los datos: 1) En primer lugar, existe una gran **similitud** entre los **errores esperados** y los errores **empíricos** en las variables colorimétricas analizadas (pendiente de las líneas de confusión y claridad protanope o deuteranope; sobre todo para las CCB primarias). 2) Existe una gran **concordancia** entre las **asimetrías** de los errores registradas a nivel **empírico** y las **esperadas**. La interpretación más plausible de este hecho es que las asimetrías presentes en las matrices de confusión son una consecuencia lógica, derivada de la coexistencia de dos factores: 1) las confusiones cromáticas características de los daltónicos dicrómatas, y 2) las características colorimétricas del mapa de las CCB en los colores de superficie.

5.3. Sin embargo, el Modelo B se ajusta mucho mejor a los datos que el Modelo A: 1) predice mucho mejor la **frecuencia de selección** así como la distribución del **número de errores** en función de los diferentes TCB, 2) predice mucho mejor la localización de los **centroides**, 3) reproduce mucho mejor la **matriz de confusión**, y 4) permite estimar la importancia de la **discriminación residual rojo-verde** a nivel individual (en términos de incremento en la proporción de varianza explicada por la inclusión de dicha variable).

5.4. Este resultado es del todo relevante, porque desde el punto de vista **teórico** implica que en el uso de los TCBs la discriminación residual es importante, y desde el punto de vista **aplicado** arroja serias dudas sobre todos aquellos

instrumentos que intentan simular la apariencia del color de daltónicos dicrómatas basándose en la hipótesis de la reducción.

6. Observadores mayores.

- 6.1. El criterio seguido para separar a los observadores mayores en aquellos **con y sin defectos tritán** se ha mostrado **altamente predictivo** del comportamiento en las tareas de mapa de colores y búsqueda de mejores ejemplares, al menos a nivel grupal: los observadores con defectos tritán cometieron un mayor porcentaje de errores en ambas tareas.
- 6.2. A raíz de los resultados obtenidos, fundamentalmente los derivados del MDS, puede establecerse claramente una “línea de deterioro” según la cual el mecanismo cromático *amarillo-azul* va perdiendo capacidad de discriminación con la edad. En este sentido, resulta de gran interés resaltar que, aunque los mayores que pasaron los tests lo hicieron sin cometer ningún error de tipo tritán, la solución tridimensional del MDS aplicado a los datos sobre conexiones entre categorías sí reveló que en ese grupo la dimensión claridad desplazó al mecanismo amarillo-azul a la tercera dimensión. De la misma forma, resulta muy interesante señalar que, aunque ambos grupos no se diferenciaron en la frecuencia de selección de estímulos de ningún TCB en la tarea de mapa de colores, sí lo hicieron ostensiblemente, como ya se ha señalado, en el rendimiento exhibido en dicha tarea.
- 6.3. En esta tesis se han evaluado dos modelos de predicción de errores en el uso de TCB por parte de observadores mayores: el **Modelo C** (de predicción de errores basado en el filtrado prerretiniano sin compensación), y el **Modelo D** (de predicción de errores basado en el filtrado prerretiniano con reescalamiento de la respuesta de los conos). Estos modelos se han inspirado, respectivamente, en el trabajo de Lindsay y Brown (2002), en el que se efectuó una simulación de la visión del color en personas envejecidas, y los múltiples trabajos que aportan evidencias experimentales a favor de la existencia de un mecanismo de compensación del sistema visual, que hasta cierto punto es garante de la constancia del color a lo largo del ciclo vital, neutralizando en parte el aumento en la densidad óptica del cristalino asociado a la edad. Concretamente, el mecanismo de compensación simulado ha sido el reescalamiento de los conos (Neitz et al., 2002).

- 6.4. El Modelo C fue absolutamente incapaz de predecir** el comportamiento empírico de los mayores con defectos tritán.
- 6.5. El Modelo D logró reproducir mucho mejor la matriz de confusión empírica**, tanto la del grupo de observadores mayores con defectos tritán, como la del subgrupo de observadores no afáquicos que pasaron los tests. Sin embargo, este modelo también fue incapaz de predecir la distribución del **número de errores** en función de los diferentes TCB, aunque para siete de las once categorías las pruebas de bondad de ajuste no mostraron diferencias significativas.
- 6.6.** Por lo tanto, a juzgar por el comportamiento exhibido en la tarea de mapa de colores, concluimos que en los observadores mayores, sobre todo en aquellos no afáquicos que pasaron los tests, ha habido una **compensación del sistema visual** ante los cambios sufridos por el amarillamiento del cristalino (y también ante otros cambios fisiológicos como pueden ser la disminución de la población y de la densidad óptica de los fotorreceptores, o la degeneración de células ganglionares). Sin embargo, la compensación propuesta por el Modelo D parece ser demasiado optimista, y por lo tanto **el modelo debe mejorarse para tener en cuenta otras variables de cara a predecir con éxito los errores que cometen este tipo de observadores.**

2.5. CAPÍTULO 9: LIMITACIONES DE LA PRESENTE INVESTIGACIÓN Y PERSPECTIVAS FUTURAS

En la discusión de los dos estudios realizados ya se han apuntado algunas de las limitaciones de esta tesis. Aprovechamos este apartado para recordarlas e indicar otras nuevas, así como para hacer una relación de futuras líneas de investigación:

1. El **muestreo de los estímulos**, aunque ha satisfecho el objetivo de incluir ejemplares con diferente grado de pertenencia a todas y cada una de las CCBs, inevitablemente juega en contra de permitir una estimación ideal del volumen colorimétrico de los aciertos y los errores asociados al uso de cada TCB. El efecto del muestreo puede por lo tanto concretarse en los dos aspectos siguientes: 1) las distribuciones de aciertos y errores, así como las matrices de confusión ofrecidas en esta tesis, pueden ser, en parte, dependientes de los estímulos empleados, y 2) la estimación de los parámetros de los modelos también puede resultar, en parte, susceptible de dicha dependencia.
2. La **presentación simultánea** de los estímulos, ha podido influir sobre los resultados de la tarea, debido a efectos como la inducción cromática y acromática. Además, los datos y modelos que aquí se presentan, muy especialmente para daltónicos dicrómatas, deben siempre limitarse al **tamaño estimular** utilizado.
3. La formalización de los modelos ha partido de algunos **supuestos**, como por ejemplo la validez del cómputo de la claridad transformada, que no han sido comprobados. Además, las **métricas** en las que se han efectuado los cálculos de las distancias son sin duda mejorables. Por ejemplo, es sabido que la distancia CIELAB ofrece mejores estimaciones de la distancia perceptiva entre colores de superficie que la distancia CIELUV. Puesto que los análisis colorimétricos de los errores han estado íntimamente ligados al establecimiento de las líneas (rectas) de confusión, hemos preferido emplear el espacio CIELUV. Sin embargo, dada la naturaleza del nivel de medida de los análisis efectuados (ordinal), podemos confiar en los resultados obtenidos. Mucho más discutible es, sin embargo, el uso directo de la métrica LMS para el cómputo de distancias.

4. La **formalización de los modelos** de predicción de errores no ha tenido en cuenta información que puede resultar de máximo interés. Más concretamente:

4.1. Estudio 1: El análisis pormenorizado de los errores cometidos en la tarea de búsqueda de mejores ejemplares, ha ayudado a entender en parte la razón de los malos ajustes para *naranja* y *morado* en protanopes. Un mejor muestreo de los estímulos (punto 1), o la inclusión de información relacionada con el comportamiento de los umbrales incrementales en daltónicos dicrómatas, podría ayudar a perfeccionar los modelos de predicción de errores.

4.2. Estudio 2: El mal ajuste del Modelo D a la hora de predecir el uso de algunos términos como *negro*, *azul* o *morado*, plantea seriamente la necesidad de incluir nuevas variables en este modelo. Quizá la más relevante sea el efecto que el ruido tiene sobre las discriminaciones mediadas por los conos S, seguida de una reducción en la discriminación cromática del mecanismo *rojo-verde*. En otras palabras, de nuevo parece que la información relacionada con el comportamiento de los umbrales incrementales podría ayudar a perfeccionar el modelo de predicción de errores.

A continuación se mencionan algunas líneas futuras de investigación derivadas en parte de las limitaciones reseñadas:

1. El uso de un tamaño estimular de 4°, ha facilitado la aparición de discriminación residual *rojo-verde* en dicrómatas. Una clara línea de investigación futura sería **manipular intencionalmente el tamaño de los estímulos presentados**, y observar su influencia sobre los datos y los modelos. Concretamente, es de esperar que con tamaños menores, el valor del parámetro *b* (exponente) asociado al grado de discriminación residual, tienda a 0, y a medida que aumente el tamaño estimular, crezca hasta alcanzar una asíntota. Actualmente contamos con una base de datos de denominación del color en dicrómatas, obtenidos presentando secuencialmente, en un CRT convenientemente calibrado, los estímulos de color que conformaron la muestra de la presente investigación. En la Figura 9.1 se muestran los resultados preliminares. Puede verse que al emplear estímulos cuadrados de 2° de lado, el comportamiento de los dicrómatas, sobre todo de los deuteranopes, se acerca más a las predicciones del Modelo A que los presentados en esta tesis.

2. Otra manipulación experimental muy interesante sería la relacionada con el **nivel de iluminación**. Podría estudiarse el comportamiento de varias variables dependientes tanto en dicrómatas como en observadores mayores. Por ejemplo, el porcentaje de errores en función de las distintas categorías, o el valor estimado para el parámetro b en el caso de los dicrómatas. Recuérdese que el nivel de iluminación puede influir muy significativamente sobre la discriminación cromática, tanto en observadores mayores (la discriminación mediada por los conos S se ve alterada en gran medida), como en dicrómatas (los bastones son uno de los mecanismo que pueden estar mediando la discriminación residual).
3. La técnica de escalamiento multidimensional ofrece una variante, la técnica **INDSCAL** (escalamiento multidimensional de diferencias individuales), que podría resultar muy útil para otorgar pesos a los diferentes observadores en función de la importancia que tienen de cara al establecimiento de las dimensiones derivadas en el análisis. No obstante, debido a las características del diseño de esta investigación, algunas matrices individuales ofrecen muy poca información sobre las conexiones entre categorías. En un futuro, podría perfeccionarse el diseño (cada observador realizaría la tarea varias veces) para enriquecer la información contenida en dichas matrices, y aprovechar los beneficios de dicha técnica.
4. En el caso de los **observadores mayores**, sería muy interesante efectuar estimaciones individualizadas de la densidad óptica del cristalino (utilizando por ejemplo el método de van Norren y Vos), así como del efecto de la miosis senil, para evaluar hasta qué punto estos factores influyen sobre los datos de categorización del color (recuérdese la hipótesis principal de trabajo con personas mayores: hay que disociar los efectos ópticos de los derivados de etapas de procesamiento superior). De la misma forma, un diseño de tipo longitudinal en el que los mismos observadores categorizaran los mismos estímulos, resultaría máximamente interesante. Por último, a la luz de los errores propios de los daltónicos dicrómatas y del envejecimiento del cristalino, cabría preguntarse cómo afecta este último a la categorización del color en daltónicos dicrómatas.

5. Por supuesto, una vez mejorados los modelos descritos, cuyo objetivo es aunar los conocimientos psicofísicos con el comportamiento exhibido a nivel de categorización del color, queda abierta la puerta a la inclusión de factores de otra índole, como son los factores cognitivos de orden superior.

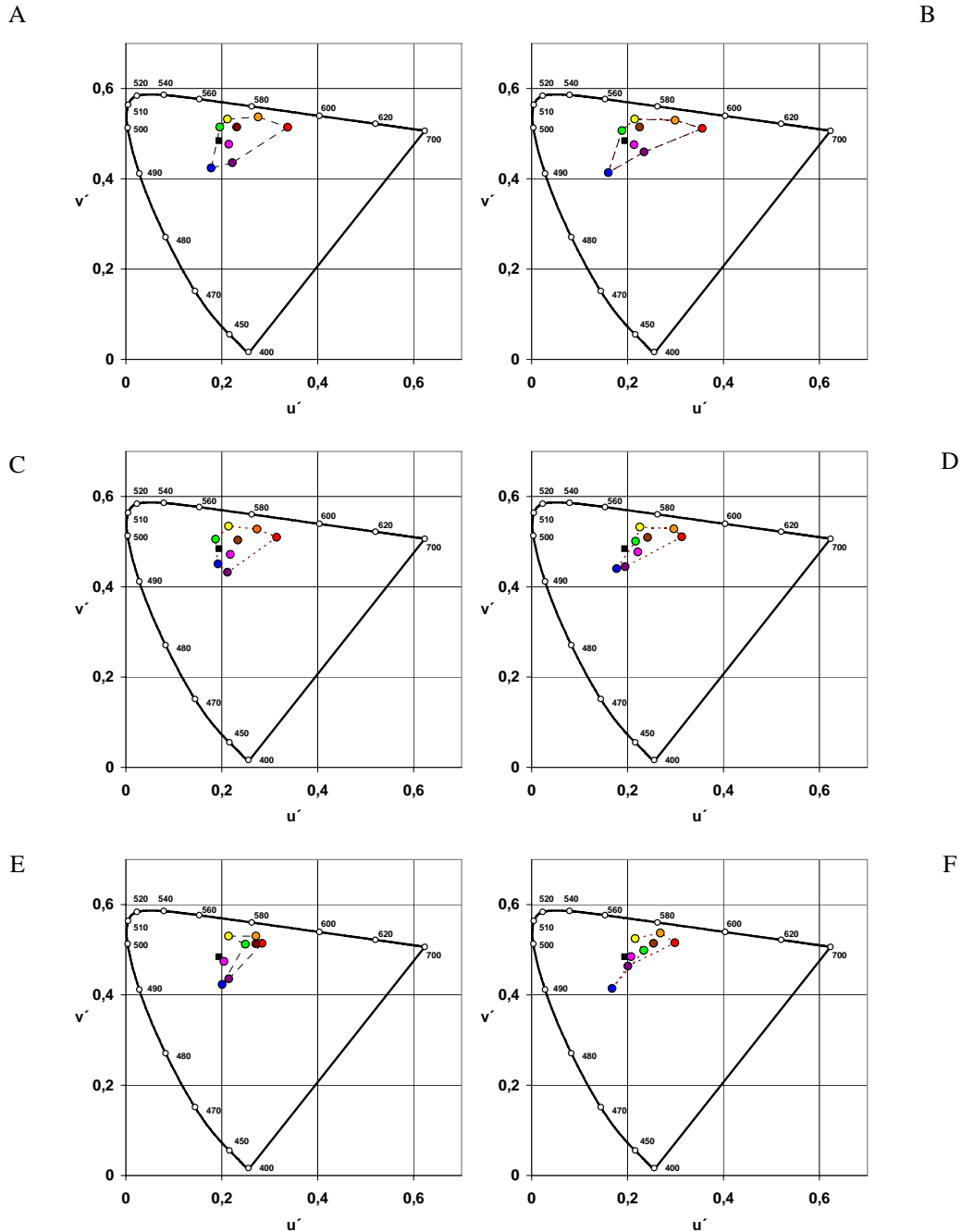


Figura 9.1. Representación de las coordenadas cromáticas de los centroides de las CCB cromáticas en el diagrama CIE $u'v'$ 1976-3. Centroides empíricos del grupo de protanopes (A) y deuteranopes (B) obtenidos en esta tesis. Centroides empíricos del grupo de protanopes (C) y deuteranopes (D) obtenidos en una tarea de denominación del color de estímulos cuadrados, de 2° de lado, presentados secuencialmente en un CRT. Centroides computados a partir de las predicciones del Modelo A para protanopes (E) y deuteranopes (F).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anderson, R. S., Coulter, E., Zlatkova, M. B. y Demirel, S. (2003). Short-wavelength acuity: optical factors affecting detection and resolution of blue-yellow sinusoidal gratings in foveal and peripheral vision. *Vision Research*, 43 (1), 101-107.
- Asenjo, A. B., Rim, J. y Oprian D. D. (1994). Molecular determinants of human red/green color discrimination. *Neuron*, 12, (5):1131-1138.
- Beare, A. C. (1963). Color-name as a function of wave-length. *American Journal of Psychology*, 76, 248-256.
- Beare, A. C. y Siegel, M. H. (1967). Color-name as a function of wavelength and instruction. *Perception and psychophysics*, 2 (11), 521-527.
- Berlin, B. y Kay, P. (1969). *Basic color terms: their universality and evolution*. Berkeley: University of California Press.
- Bimler, D. L. y Paramei, G. V. (2004). Luminance-dependent hue shift in protanopes. *Visual Neuroscience*, 21, 403-407.
- Bimler, D. L. y Paramei, G. V. (2005). Bezold-Brücke effect in normal trichromats and protanopes. *Journal of the Optical Society of America*, 22, 2120-2136.
- Birch, J. (1993). *Diagnosis Of Defective Colour Vision*. Oxford: Oxford University Press.
- Bonnardel, V. (2006). Color naming and categorization in inherited color vision deficiencies. *Visual Neuroscience*, 23, 637-643.
- Boynton, R. M. (1975). Color, hue, and wavelength. En E. C. Carterette y M. P. Friedman (Eds.). *Handbook of Perception, Vol. 5*. New York: Academic Press.
- Boynton, R. M. (1997). Insights gained from naming the OSA color. En C. L. Hardin y L. Maffi (Eds.). *Color Categories in thought and language* (pp.135-150). Cambridge: Cambridge University Press.
- Boynton, R. M., Fargo, L. y Collins, B. L. (1990). Categorical color rendering of four common light sources. *Color Research and Application*, 15, 222-230
- Boynton, R. M., Fargo, L., Olson, C. X. y Smallman, H. S. (1989). Category effects in color memory. *Color Research and Application*, 14, 234-299.
- Boynton, R. M. y Gordon, J. (1965). Bezold-Brücke hue shift measured by a color naming technique. *Journal of the Optical Society of America*, 55, 78-86.

- Boynton, R. M. y Kambe, N. (1980). Chromatic difference steps of moderate size measured along theoretically critical axes. *Color Research and Application*, 5, 13-23.
- Boynton, R. M. y Olson, C. X. (1987). Locating basic colors in the OSA space. *Color Research and Application*, 12, 94-105.
- Boynton, R. M. y Olson, C. X. (1990). Salience of chromatic basic color terms confirmed by three measures. *Vision Research*, 30, 1311-1317.
- Boynton, R. M. y Purl, K. F. (1989) Categorical color perception under low-pressure sodium lighting with small amounts of added incandescent illumination, *Lighting Research and Technology*, 21, 23-27.
- Boynton, R. M., Schafer, W. y Neun, N. E. (1964). Hue-wavelength relation measured by color naming method for three retinal locations. *Science*, 146, 666-668.
- Boynton, R. M. y Scheibner, H. (1967). On the perception of red by red-blind observers. *Acta Chromatica*, 1, 205-220.
- Brainard, D. H. (2003). Color appearance and color difference specification. En S. K. Shevell (Ed.). *The Science of Color* (2nd Ed.) (pp. 191-216). Amsterdam: Optical Society of America.
- Breton, M. E. y Cowan, W. B. (1981). Deuteranomalous color matching in the deuteranopic eye. *Journal of the Optical Society of America*, 71, 1220-1223.
- Brettel, H., Viènot, F. y Mollon, J. D. (1997). Computerized simulation of color appearance for dichromats. *Journal of the Optical Society of America, A*, 14, 2647-2655.
- Capilla, P., Artigas, J. M. y Pujol, J. (Coords.) (2002). *Fundamentos de colorimetría*. Valencia: Universitat de València.
- CIE-UK (2006). NPL REPORT DQL-OR 019. *Better Lighting for Improved Human Performance, Health and Well-Being, and Increased Energy Efficiency - A Scoping Study for CIE-UK*.
- Cline, D., Hofstetter, H. W. y Griffin, J. R. (1997). *Dictionary of visual science* (4th Ed.). Boston: Butterworth-Heineman.
- Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin*, 112, 155-159.
- Cole, B. L. Lian, K-Y., Sharpe, K. Lakkis, C. (2006). Categorical Color Naming of Surface Color Codes by People With Abnormal Color Vision. *Optometry and Vision Science*, 83 (12), 879-886.
- Coren, S. y Girgus, J. S. (1972). Density of the human lens pigmentation. *Vision*

- Research*, 12, 343-346.
- Crawford, T. D. (1982). Defining “basic colour terms”. *Anthropological Linguistics*, 24, 338-343.
- Crognale, M. A., Teller, D. Y., Yamaguchi, T., Motulsky, A. G. y Deeb, S. S. (1999). Analysis of red/green color discrimination in subjects with a single X-linked photopigment gene. *Vision Research*, 39, 707-719.
- Davies, I. R. L., y Corbett, G. G. (1994). The basic color terms of Russian. *Linguistics*, 32, 63-89.
- Davies, I. R. L. y Corbett, G. G. (1997). Establishing Basic color terms: measures and techniques. En C. L. Hardin y L. Maffi (Eds.). *Color Categories in thought and language* (pp.197-223). Cambridge: Cambridge University Press.
- De Valois, R. L., Abramov, J. y Jacobs, G. H. (1966). Analysis of response patterns of LGN cells. *Journal of the Optical Society of America*, 56, 966-977.
- Delahunt, P., Webster, M. A., Ma, L. y Werner, J. S. (2004). Color appearance changes after cataract surgery reveal a long-term chromatic adaptation mechanism. *Visual Neuroscience*, 21, 301-307.
- Dubbelman, M., Van der Heijde, G. L., Weeber, H. A. y Vrensen G. F. J. M. (2003). Changes in the internal structure of the human crystalline lens with age and accommodation. *Vision Research*, 43, 2363-2375.
- Fletcher, R. J. (1980). *The City University Colour Vision Test* (2ndEd.). London: Keeler.
- Fletcher, R. J. y Voke, J. (1985). *Defective Colour Vision: Fundamentals, Diagnosis and Management*. Bristol: Adam Hilger.
- Forte, J. D., Blessing, E. M., Buzás, P. y Martin, P. R. (2006). Contribution of chromatic aberrations to color signals in the primate visual system. *Journal of Vision*, 6, 97-105.
- Fuld, H. y Alie, A. M. (1985). Hue naming: a test of the validity of Werner and Wooten's average observer. *Perception and Psychophysics*, 37 (2):145-477.
- Fuld, K., Wooten, B. R. y Whalen, J. J. (1981). The elemental hues of short-wave and extra-spectral lights. *Perception and Psychophysics*, 29, 317-322.
- Gordon, J., Abramov, I. y Chan, H. (1994). Describing color appearance: Hue and saturation scaling. *Perception and Psychophysics*, 56, 27-41.
- Guth, S. L., Massof, R. W. y Benzschawel, T. (1980) Vector model for normal and dichromatic color vision. *Journal of the Optical Society of America*, 70 (2), 197-212.

- Haigh, R. (1993). *The ageing process: a challenge for design*. *Applied Ergonomics*, 24, 1, 9-14.
- Hård, A., Sivick, L. y Tonnquist, G. (1996). NCS, Natural colour system - From concept to research and applications. Part I. *Colour Research and Application*, 21, 180-205.
- Hård, A., Sivik, L. y Tonnquist (1996). NCS, Natural Color System - from concept to research and applications. Part II. *Color Research and Application*, 21, 206-220.
- Hardin, C. L. y Maffi, L. (1997). Introduction. En C. L. Hardin y L. Maffi (Eds.). *Color Categories in thought and language* (pp. 1-18). Cambridge: Cambridge University Press.
- Hardy, J. L., Delahunt, P. B., Okajima, K. y Werner, J. S. (2005). Senescence of spatial chromatic contrast sensitivity. I. Detection under conditions controlling for optical factors. *Journal of the Optical Society of America, A*, 22 (1): 49-59.
- Hardy, J. L., Frederick, C. M., Kay, P. y Werner, J. S. (2005). Color naming, lens aging, and grue: what the optics of the aging eye can teach us about color language. *Psychological Science*, 16 (4), 321-327.
- Hunt, D. M., Kanwaljit, S. D., Bowmaker, J. K. y Mollon, J. D. (1995). The chemistry of John Dalton's color blindness. *Science*, 267, 984-988.
- Hunt, R. W. G. (1995). *Measuring colour* (2nd Ed.). London: Ellis Horwood.
- Hurvich, L. M. (1981). *Color vision*. Sunderland: Sinauer Associates.
- Hurvich, L. M. y Jameson, D. (1955). Some Quantitative Aspects of an Opponent-Colors Theory. II. Brightness, Saturation, and Hue in Normal and Dichromatic Vision. *Journal of the Optical Society of America*, 45, 602-616.
- IEE (2004). Colour Vision Defects: A Health and Safety Fact Sheet produced by the IEE, Institute of Electrical Engineers, *Issue 2.1*.
- Ishihara, M. D. (1996). *Ishihara's tests for colour-deficiency: 24 Plates Edition*. Tokyo, Japan: Kanehara y Co., Ltd.
- Jackson, G. R., Owsley, C., Cordle., E. P. y Finley, C. D. (1998). Aging and scotopic sensitivity. *Vision Research* 38, 3655-3662.
- Jameson, D. y Hurvich, L. M. (1955). Some Quantitative Aspects of an Opponent-Colors Theory. I. Chromatic Responses and Spectral Saturation. *Journal of the Optical Society of America*, 45, 546-552.

- Jameson, D. y Hurvich, L. M. (1968). Opponent-Response Functions Related to Measured Cone Photopigments. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 429-430.
- Jameson, D. y Hurvich, L. M. (1978). Dichromatic color language: “Reds” and “Greens” don’t look alike but their colors do. *Sensory Processes*, 2, 146-155.
- Jameson, K. A. y Komarova, N. L. (2009a). Evolutionary models of color categorization. I. Population categorization systems based on normal and dichromat observers. *Journal of the Optical Society of America, A*, 26, 1414-1423.
- Jameson, K. A. y Komarova, N. L. (2009b). Evolutionary models of categorization. II. Investigations based on realistic observer models and population heterogeneity. *Journal of the Optical Society of America, A*, 26, 1424-1436.
- Johnson, M. A. y Choy, D. (1987). On the definition of age-related norms for visual function testing. *Applied Optics*, 26, 1449-1454.
- Judd, D. B. (1951). Report of U. S. Secretariat Committee on Colorimetry and Artificial Daylight. En *Proceedings of the Twelfth Session of the CIE, Stockholm, Tech. Committee No. 7*. Paris: Bureau Central de la CIE.
- Kaiser, P. K. (1988). Sensation luminance: a new name to distinguish CIE luminance from luminance dependent on an individual's spectral sensitivity. *Vision Research*, 28 (3), 455-456.
- Kaiser, P. K. y Boynton, R. M. (1996). *Human Color Vision* (2nd Ed.). Washington, DC: Optical Society of America.
- Kay, P. (1975). Synchronic Variability and Diachronic Change in Basic Color Terms. *Language in Society*, 4, 257-270.
- Kay, P., Berlin, B., Maffi, L y Merrifield, W. (1997). Color naming across languages. En C. L. Hardin y L. Maffi (Eds.). *Color Categories in thought and language* (pp. 21-56). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kay, P., Berlin, B. y Merrifield, W. R. (1991). Biocultural implications of systems of color naming. *Journal of Linguistic Anthropology*, 1, 12-25.
- Kay, P. y Maffi, L. (2000). Color appearance and emergence and evolution of basic color lexicons. *American Anthropologist*, 101, 743-760
- Kay, P. y McDaniell, C. K. (1978). The linguistic significance of the meaning of basic color terms. *Language*, 54, 610-646.

- Knoblauch, K., Saunders, F., Kusuda, M., Hynes, R., Podgor, M., Higgins, K. E. y deMonasterio, F. M. (1987). Age and illuminance effects in the Farnsworth-Munsell 100-hue test. *Applied Optics*, 26, 1441-1448.
- Kraft, J. M. y Werner, J. S. (1994). Spectral efficiency across the life span: flicker photometry and brightness matching. *Journal of the Optical Society of America, A*, 11, 1213-1221.
- Kraft, J. M. y Werner, J. S. (1999a). Aging and the saturation of colors. 1. Colorimetric purity discrimination. *Journal of the Optical Society of America, A*, 16, 222-230.
- Kraft, J. M. y Werner, J. S. (1999b). Aging and the saturation of colors. 2. Scaling of color appearance. *Journal of the Optical Society of America, A*, 16, 231-235.
- Lanthony, P. (1985). *Album tritan*. Paris: Luneau Ophtalmologie.
- Le Grand, Y. (1972). Spectral luminosity. En D. J. Jameson y L. M. Hurvich (Eds.). *Handbook of sensory physiology (VII/4). Visual psychophysics* (pp.413-433). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Lillo, J. (2000). *Ergonomía: Evaluación y diseño del entorno visual*. Madrid: Alianza.
- Lillo, J., Aguado, L., Moreira, H. y Davies, I. (2004). Lightness and hue perception: The Bezold-Brücke effect and colour basic categories. *Psicológica*, 25, 23-43.
- Lillo, J., Davies, I., Collado, J., Ponte, E. y Vitini, I. (2001). Colour naming by colour blind children. *Anuario de Psicología*, 32 (3), 5-24.
- Lillo, J. y Moreira, H. Color blindness. (2004a). En C. D. Spilberger (Ed.). *Encyclopedia of Applied Psychology. Vol. 1.* (pp. 411-420). New York: Elsevier Academic Press.
- Lillo, J. y Moreira, H. (2004b). Envejecimiento y diseño universal. *Anuario de Psicología*, 35 (4), 493-506.
- Lillo, J. y Moreira, H. (2004c). Las categorías cromáticas básicas del Español: Síntesis final. *Óptica Pura y Aplicada*, 37, 125-130.
- Lillo, J. y Moreira, H. (2005). Relative luminance and figure-background segmentation problems: Using AMLA to avoid no-discernible stimuli pairs in common and colour blind observers. *Psicológica*, 26, 189-207.
- Lillo, J. y Moreira, H. (2008). Colores de superficie y uso de categorías de color básicas en dicrómatas rojo-verde. *Óptica Pura y Aplicada*, 41 (3), 251-259.
- Lillo, J., Moreira, H. y Gómez, N. (2002). Reflectance and Energetic Imbalance: Colorimetric Evaluation of the NCS Colour Atlas. *Psicológica*, 23, 209-231.

- Lillo, J., Moreira, H., Vitini, I. y Martín, J. (2007). Locating Basic Spanish Colour Categories in CIE $L^*u^*v^*$ Space: Identification, Lightness Segregation and Correspondence with English Equivalents. *Psicológica*, 28, 21-54.
- Lillo, J., Vitini, I., Caballero, A. y Moreira, H. (2001). Toward a model to predict macular dichromats' naming errors: Effects of CIE saturation and dichromatism type. *Journal of Spanish Psychology*, 4, 26-36.
- Lin, H., Luo, M. R., MacDonald, L. W. y Tarrant, A. W. S. (2001a). A cross-cultural colour-naming study. Part I: Using an unconstrained method. *Color Research and Application*, 26, 40-60.
- Lin, H., Luo, M.R., MacDonald, L. W. y Tarrant, A. W. S. (2001b). A cross-cultural colour-naming study. Part II: Using a constrained method. *Color Research and Application*, 26, 193-208.
- Lin, H., Luo, M.R., MacDonald, L. W. y Tarrant, A. W. S. (2001c). A cross-cultural colour-naming study. Part III: A colour-naming model. *Color Research and Application*, 26, 270-277.
- Lindsey, D. T. y Brown, A. M. (2002). Color naming and the phototoxic effects of sunlight on the eye. *Psychological Science*, 13, 506-512.
- MacLeod, D. I. A. y Boynton, R. M. (1979). Chromaticity diagram showing cone excitation by stimuli of equal luminance. *Journal of the Optical Society of America*, 69, 1183-1186.
- Maffi, L. y Hardin, C. L. (1997). Closing thoughts. En C. L. Hardin y L. Maffi (Eds.). *Color Categories in thought and language* (pp. 347-372). Cambridge: Cambridge University Press.
- Martínez Arias, R. (1999). *El análisis multivariante en la investigación científica*. Madrid. Editorial La Muralla-Hespérides.
- Mellerio, J. (1971). Light absorption and scatter in the human lens. *Vision Research*, 11, 129-141.
- Mellerio, J. (1987). Yellowing of the human lens: nuclear and cortical contributions. *Vision Research*, 27, 1581-1587.
- Merbs, S. L. y Nathans, J. (1992a). Absorption spectra of human cone pigments. *Nature*, 356, 433-435.
- Merbs, S. L. y Nathans, J. (1992b). Absorption spectra of the hybrid pigments responsible for anomalous color vision. *Science*, 258, 464-466.

- Mitchell, D. E. y Rushton, W. A. H. (1971). Visual pigments in dichromats. *Vision Research*, 11, 1033-1043.
- Mollon, J. D. (2003). The Origins of modern color science. En S. K. Shevell (Ed.). *The Science of Color* (2nd Ed.) (pp. 1-39). Amsterdam: Optical Society of America.
- Montag, E. D. (1994). Surface color naming in dichromats. *Vision Research*, 34, 2137-2151.
- Montag, E. D. y Boynton, R. M. (1987). Rod influence in dichromatic surface color perception. *Vision Research*, 27, 2153-2162.
- Moreira, H. (2003). *AMLA y alteraciones fotométricas*. Tesina defendida ante tribunal para la obtención del grado de licenciado. Facultad de Psicología de la UCM. Manuscrito no publicado.
- Moreira, H. y Lillo, J. (2004). Diseño ergonómico y envejecimiento. *Boletín Digital de Factores Humanos*, 26.
- Nagy, A. L. (1980). Large-field color matches of dichromats. *Journal of the Optical Society of America*, 70, 778-784.
- Nagy, A. L. y Boynton, R. M. (1979). Large-field color naming of dichromats with rods bleached. *Journal of the Optical Society of America*, 69, 1259-1265.
- Neitz, M., Kraft, T. W. y Neitz, J. (1998). Expression of L cone pigment gene subtypes in females. *Vision Research*, 38, 3221-3255.
- Neitz, M. y Neitz, J. (1998). Molecular genetics and the biological basis of color vision. En W. G. K. Backhaus, R. Kliegl, y J. S. Werner (Eds.). *Color vision: perspectives from different disciplines*. Berlin (etc): Walter de Gruyter.
- Neitz, M., Neitz, J. y Jacobs, G. H. (2002). Spectral tuning of pigments underlying red-green color vision. *Science*, 252, 971-974.
- Newton, I. (1671). New theory about light and colors. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 80, 3075-3087. Reimpreso en D. MacAdam (Ed.). *Selected papers on Colorimetry-Fundamentals* (1993) (pp. 4-5). Bellingham: SPIE Milestone Series.
- Norren, D. V. y Vos, J. J. (1974). Spectral transmission of the human ocular media. *Vision Research*, 14, 1237-1244.
- Obama, T., Ikeda, M., Sagawa, K. y Shinoda, H. (2005). Range of similar colours with and without cataract experiencing goggles. En AIC Colour 05 -the 10th Congress of the International Colour Association in Granada, Spain (May 8-13,

- 2005). [Proceedings book of AIC Colour 05, Eds. J. L. Nieves y J. Hernandez-Andrés, pp. 13-16].
- Packer, O. y Williams, D. R. (2003). Light, the Retinal Image, and Photoreceptors. En S. K. Shevell (Ed.). *The Science of Color* (2nd Ed.) (pp. 41-102). Amsterdam: Optical Society of America.
- Paramei, G. V. (1996). Color space of normally sighted and color deficient observers reconstructed from color naming. *Psychological Science*, 7, 311-317.
- Paramei, G. V., Bimler, D. L. y Cavanus, C. R. (1998). Effects of luminance on color perception of protanopes,” *Vision Research*, 38, 3397-3401.
- Pardo, A. y San Martín, R. (1994). Análisis de datos en psicología II. Madrid: Pirámide.
- Pitt, F. H. G. (1935). Characteristics of dichromatic vision. *Medical Research Council Special Report Series*, 200. London: His Majesty's Stationery Office.
- Pointer, M. R. y Attridge, A. (1998). The number of discernible colours. *Colour Research and Application*, 23, 52-54.
- Pokorny, J. y Smith, V. (1986) Colorimetry and Color Discrimination. En K. R. Boff, L. Kaufman y J. P. Thomas (Eds.). *Handbook of Perception and Human Performance, Vol. I: Sensory Processes and Perception* (pp. 8-1-8-51). New York: John Wiley and Sons.
- Pokorny, J., Smith, V. y Lutze, M. (1987). Aging of the human lens. *Applied Optics*, 26, 1437-1440.
- Pujol, J. (2002). Colorimetría aplicada en optometría y oftalmología. En J. M. Artigas, P. Capilla y J. Pujol (Coords.). *Tecnología del color* (pp. 299-327). Valencia: Universitat de València.
- Quinn, P. C., Rosano, J. L. y Wooten, B. R. (1988) Evidence that brown is not an elemental color. *Perception and Psychophysics*, 43, 156-164.
- Quinn, P. C., Wooten, B. R. y Ludman, E. J. (1985). Achromatic colour categories. *Perception and Psychophysics*, 37, 198-204.
- Ratliff, F. (1976). On the psychophysiological basis of universal color terms. *Proceedings of the American Philosophy Society*, 120, 311-330.
- Real Deus, J. E. (2001). *Escalamiento Multidimensional*. Madrid: La Muralla, D. L.
- Regan, B. C., Reffin, J. P. y Mollon J. D. (1994). Luminance Noise and the Rapid Determination of Discrimination Ellipses in Colour Deficiency. *Vision Research*. 34, 10, 1279-1299.

- Regier, T. y Kay, P. (2004) Color naming and sunlight: Commentary on Lindsey and Brown (2002). *Psychological Science*, 15:289-290.
- Romeskie, M. (1978). Chromatic opponent-response functions of anomalous trichromats. *Vision Research* 18 (11), 1521-1532
- Rosch, E. R. (1971). 'Focal' color areas and the development of color names. *Developmental Psychology*, 4, 447-455.
- Rosch-Heider, E. R. (1972). Universals in color naming and memory. *Journal of Experimental Psychology*, 93, 10-20.
- Ruddock, K. H. (1972). Light transmission through the ocular media and macular pigment and its significance for psychophysical investigation. En D. J. Jameson y L. M. Hurvich (Eds.). *Handbook of sensory physiology (VII/4). Visual psychophysics* (pp. 455-469). Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.
- Sagawa, K. y Takahashi, Y. (2001). Spectral luminous efficiency as a function of age. *Journal of the Optical Society of America-A*, 18, 11, 2659-2667.
- Scheffrin, B. E. y Werner, J. S. (1990). Loci of spectral unique hues throughout the life span. *Journal of the Optical Society of America, A*, 7, 305-311
- Scheffrin, B. E. y Werner, J. S. (1993). Age-related changes in the color appearance of broadband surfaces. *Color Research and Application*, 18, 380-389.
- Scheffrin, B. E., Shinomori, K. y Werner, J. S. (1995). Contributions of neural pathways to age-related losses in chromatic discrimination. *Journal of the Optical Society of America-A*, 12, 1233-1241.
- Scheibner H. y Boynton, R. M. (1968). Residual red-green discrimination in dichromats. *Journal of the Optical Society of America*, 58, 1151-1158.
- Sharpe, L. T., Stockman, A., Jägle, H. y Nathans, J. (1999). Opsin genes, cone photopigments, color vision and colorblindness. En K. Gegenfurtner y L. T. Sharpe (Eds.). *Color vision: from genes to perception* (pp. 3-51) Cambridge: Cambridge University Press.
- Shinomori, K. (2005). Ageing effects on colour vision. Changed and unchanged perceptions. En AIC Colour 05 -the 10th Congress of the International Colour Association in Granada, Spain (May 8-13, 2005) [Proceedings book of AIC Colour 05, Eds. J. L. Nieves y J. Hernandez-Andrés, pp. 7-12].
- Shinomori, K., Scheffrin, B. E. y Werner, J. S. (2001). Age-related changes in wavelength discrimination. *Journal of the Optical Society of America, A*, 18, 310-318.

- Smallman, H. S. y Boynton, R. M. (1990). Segregation of basic colors in an information display. *Journal of the Optical Society of America A*, 7, 1985-1994.
- Smith, V. C. y Pokorny, J. (1975). Spectral sensitivity of the foveal cone photopigments between 400 and 500 nm. *Vision Research*, 15, 161-171.
- Smith, V. y Pokorny, J. (2003). Color matching and color discrimination. En S. K. Shevell (Ed.). *The Science of Color* (2nd Ed.) (pp. 103-148). Amsterdam: Optical Society of America.
- Smith, V. C. y Pokorny, J. (1977). Large-field trichromacy in protanopes and deuteranopes. *Journal of the Optical Society of America*, 67, 213-220.
- Sternheim, C. y Boynton, R. (1966). Uniqueness of perceived hues investigated with a continuous judgement technique. *Journal of Experimental Psychology*, 72, 770-776.
- Stiles, W. S., y Burch, J. M. (1955). Interim report to the Commission Internationale de l'Éclairage Zurich, 1955, on the National Physical Laboratory's investigation of colour-matching (1955) with an appendix by W. S. Stiles y J. M. Burch. *Optica Acta*, 2, 168-181.
- Stiles, W. S. y Burch J. M. (1959). NPL colour-matching investigation: final report. *Optica Acta*, 6, 1-26.
- Stockman, A., MacLeod, D. I. A. y Johnson, N. E. (1993). Spectral sensitivities of the human cones. *Journal of the Optical Society of America A*, 10, 2491-2521.
- Stockman, A., y Sharpe, L. T. (2000). Spectral sensitivities of the middle- and long-wavelength sensitive cones derived from measurements in observers of known genotype. *Vision Research*, 40, 1711-1737.
- Sturges, J. y Whitfield, T. W. A. (1995). Locating basic colours in the Munsell space. *Color Research and Application*, 20, 364-376.
- Sturges, J. y Whitfield, T.W.A. (1997). Salient features of Munsell colour space as a function of monolexic naming and response latencies. *Vision Research*, 37 (3), 307-313.
- Uchikawa K., Uchikawa H. y Boynton R. M. (1989). Partial color constancy of isolated surface colors examined by a color-naming method. *Perception*, 18 (1), 83-92.
- Verriest, G. (1963). Further Studies on Acquired Deficiency of Color Discrimination. *Journal of the Optical Society of America*, 53, 185-197
- Viènot, F., Brettel, H., Ott, L., M'Barek, A. B. y Mollon, J. D. (1995). What do colour-blind people see? *Nature*, 376, 127-128.

- Vitini, I. (2002). *Las categorías cromáticas básicas del español*. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. España.
- Vos, J. J. (1978). Tabulated Characteristics of a Proposed 2° Fundamental Observer. *Color Research and Application*, 3, 125-128.
- Vos, J. J. y Walraven, P. L. (1971). On the derivation of the foveal receptor primaries. *Vision Research*, 11, 799-818.
- Wachtler, T., Dohrmann, U. y Hertel, R. (2004). Modeling color percepts of dichromats. *Vision Research*, 44, 2843-2855.
- Weale, R. A. (1986). Aging and vision. *Vision Research*, 26, 1507-1512.
- Weale, R. A. (1988). Age and the transmittance of the human crystalline lens. *Journal of physiology*, 395, 577-587.
- Werner, J. S. (1982). Development of scotopic sensitivity and the absorption spectrum of the human ocular media. *Journal of the Optical Society of America*, 72, 247-258.
- Werner, J. S. (1998). Aging through the eyes of Monet. En W. G. K. Backhaus, R. Kliegl y J. S. Werner (Eds.). *Color vision: perspectives from different disciplines* (pp. 3-41). Berlin:Walter de Gruyter.
- Werner J. S., Donnelly S. K. y Kliegl R. (1987). Aging and human macular pigment density Appended with translations from the work of Max Schultze and Ewald Hering. *Vision Research*, 27, 257-268.
- Werner, J. S. y Scheffrin, B. E. (1993). Loci of achromatic points throughout the life span. *Journal of the Optical Society of America, A*, 10, 1509-1516.
- Werner, J. S. y Steele, V. G. (1988). Sensitivity of human foveal color mechanisms throughout life span. *Journal of the Optical Society of America, A*, 5, 2122-2130.
- Werner, J. S. y Wooten, B. R. (1979a). Opponent chromatic mechanisms: Relation to photopigments and hue naming. *Journal of the Optical Society of America, A*, 69, 422-434.
- Werner, J. S. y Wooten, B. R. (1979b). Opponent chromatic response functions for an average observer, *Perception and Psychophysics*, 25, 371-374.
- Winn, B., Whitaker, D., Elliott, D. B. y Phillips, N. J. (1994). Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 35, 1132-1137.

- Wooten, B. y Miller, D. (1997). The psychophysics of colour. En C. L. Hardin y L. Maffi (Eds.). *Color Categories in thought and language* (pp.59-88). Cambridge: Cambridge University Press.
- Wright, W. D. (1952). The Characteristics of Tritanopia. *Journal of the Optical Society of America*, 42, 509-517.
- Wright, W. D. (1996). The origins of the 1931 CIE Sistem. En P. K. Kaiser y R. M. Boynton (1996). *Human Color Vision* (2nd Ed.) (pp 534-543). Washington, DC: Optical Society of America.
- Wyszecki, G. y Stiles, W. S. (1982). *Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae* (2nd Ed.). New York: John Wiley and Sons.
- Zadeh, L. (1965). *Fuzzy Sets, Information and Control*, 8: 338-353.
- Zlatkova, M. B., Coulter, E. y Anderson, R. S. (2003). Short-wavelength acuity: blue-yellow and achromatic resolution loss with age. *Vision Research*, 43 (1), 109-115.

ANEXO I: PROCEDIMIENTO PARA ANALIZAR LOS ERRORES COMETIDOS EN LA TAREA DE MAPA DE COLORES. RESUMEN DE LOS RESULTADOS DERIVADOS DE APLICAR EL CRITERIO LAXO

Para determinar los errores cometidos por los observadores dicrómatas, así como su distribución entre las diferentes categorías, se llevó a cabo el siguiente análisis:

1. Las matrices (individuales y grupales) correspondientes a los observadores protanopes y deuteranopes se compararon con la matriz grupal de los tricrómatas normales. Concretamente, esta comparación se efectuó a través de las columnas correspondientes de las diferentes matrices, es decir, estímulo a estímulo, como se describirá a continuación.
2. Se tomaron dos criterios extremos para definir un acierto (ya descritos en el apartado correspondiente):
 - a. *Criterio laxo*: Se consideró que la selección de un estímulo como un elemento de una determinada categoría era un acierto *si al menos un* TN seleccionó el estímulo considerado como perteneciente a dicha categoría.
 - b. *Criterio estricto (o criterio moda)*: Se consideró que la selección de un estímulo como un elemento de determinada categoría era un acierto si dicha categoría era la *moda* de la distribución de respuestas (de CCB) de los TN ante el estímulo considerado.

¿Por qué se tomaron estos dos criterios? Cualquier definición de acierto y error en la tarea de mapa de colores es, hasta cierto punto, arbitraria. La razón por la cual se tomaron estos dos criterios extremos para definir los aciertos, reside en el hecho de que un mismo estímulo puede ser incluido por los tricrómatas normales como perteneciente a más de una categoría, aspecto que queda recogido en la concepción de la categorización del color bajo el esquema de los conjuntos borrosos (consúltese el apartado 1.4.1.2; como ejemplo empírico, recuérdense los análisis efectuados sobre conexiones entre categorías). Supongamos que un dicrómata responde mediante una determinada categoría ante un estímulo que es incluido por el 100% de observadores en otra categoría. Parece evidente que se trata de un error. Pero, ¿y si responde con una categoría que es empleada por el 40% de los observadores, mientras que el 60% restante emplea otra categoría diferente? ¿Sería correcto tratar la respuesta del observador como

un error? En una investigación reciente que fue comentada con anterioridad (Bonnardel, 2006), se tomó como criterio que la categoría hubiese sido empleada por la mayoría de los observadores con visión normal del color para considerar que la respuesta de los observadores con visión alterada del color fuese un acierto. Este criterio es el que en esta investigación hemos denominado como *criterio estricto* (o *criterio moda*) para definir los aciertos. Evidentemente, en ocasiones como la del ejemplo anterior (emplear la misma categoría que emplea el 40% de los tricrómatas normales), este criterio parece de alguna manera crear una inflación en el número de errores (tanto más cuanto más cerca de la frontera entre categorías se encuentre un estímulo). Para evitar este sesgo, además del *criterio estricto*, emplearemos el *criterio laxo* para definir los aciertos que ha sido definido anteriormente. De forma contraria al criterio estricto, es posible que este criterio laxo de alguna manera aumente artificialmente el número de aciertos, reduciendo por ende el número de errores. Por ejemplo, imagínese que en nuestra tarea de mapa de colores sólo un observador con visión normal del color hubiese incluido un estímulo como perteneciente a la categoría X, y los otros 14 como perteneciente a la categoría Y, y que, por su parte, los 8 protanopes hubieran incluido el estímulo como perteneciente a la categoría X. Parece razonable pensar que en tal caso se está siendo muy laxo a la hora de definir la respuesta de los protanopes como un acierto.

Una vez justificado el uso de dos criterios diferentes, extremos, y contrapuestos (el criterio estricto maximiza la aparición de errores mientras que el criterio laxo la minimiza), continuemos describiendo el análisis efectuado (que por supuesto, se realizó por duplicado, para cada uno de los dos criterios de definición de los aciertos).

3. Todas aquellas respuestas no definidas como aciertos se codificaron como errores, de manera que para cada observador se construyó una matriz de dimensiones 11 x 102 introduciendo en cada celda no vacía el valor “Acierto” o “Error”. Para cuantificar la frecuencia de los aciertos y de los errores a nivel grupal, se construyeron cuatro nuevas matrices de dimensiones 11 x 102, que llamaremos A_P , A_D , E_P , y E_D , (A: aciertos, E: errores, el subíndice indica el grupo correspondiente, protanopes o deuteranopes). Estas matrices se construyeron tomando simplemente la frecuencia de selección asociada (sumando los aciertos y errores existentes en las celdas correspondientes). El

sumatorio de cada una de las filas de las matrices así construidas, indica el número de aciertos o de errores cometidos para cada CCB.

4. Para establecer la distribución de los errores a través de las diferentes categorías, es decir, tanto la categoría a la que se asignó erróneamente un estímulo, como el porcentaje con el que se realizó dicha selección, se siguió el siguiente procedimiento:
 - a. Las matrices grupales (de tricrómatas normales, \mathbf{X}_{TN} , protanopes, \mathbf{X}_P , y deuteranopes, \mathbf{X}_D) establecen la frecuencia de selección de los diferentes estímulos en función de las 11 CCB. Además, la matriz grupal de los tricrómatas normales, \mathbf{X}_{TN} , establece, para cada estímulo, una descripción interpretable en términos de pertenencia a las 11 CCB. Concretamente, la frecuencia de selección constituye el grado de pertenencia de un estímulo a una determinada categoría (consúltese Kay y McDaniel, 1978).
 - b. A partir de dichas matrices, se siguió un procedimiento que consiguiera satisfacer los siguientes objetivos:
 - i. Ponderar la importancia del error en función del *número de observadores* que lo cometieron. Esta información se encuentra en las matrices \mathbf{E}_P y \mathbf{E}_D .
 - ii. Emplear el grado de pertenencia de un estímulo a las diferentes categorías para establecer el *grado* del error cometido en función de su *naturaleza*. Esta información se encuentra en la matriz \mathbf{X}_{TN} .
 - c. Para cada categoría, se creó una nueva matriz de distribución de errores de dimensiones 11 x 102, multiplicando las frecuencias de selección codificadas en las celdas correspondientes de las matrices grupales. Así, por ejemplo se creó la matriz \mathbf{E}_{PR} que informa sobre la distribución de los errores cometidos por los protanopes al buscar ejemplares de *rojo*. El sumatorio de cada fila de esta matriz, da como resultado el total de respuestas debidas al uso erróneo de *rojo* que pertenecen a la categoría correspondiente, ponderadas en función de las frecuencias de selección (de protanopes y tricrómatas normales). Finalmente, el sumatorio global de todas las celdillas de la matriz se empleó para calcular el porcentaje de error asociado a cada una de las categorías. A modo de ejemplo, para calcular el porcentaje de errores cometidos por el grupo de protanopes al

buscar ejemplares de *rojo* debidos a la selección de estímulos pertenecientes a la categoría i ($i = 1, 2, \dots, 11$), se computa la expresión

$$\frac{\sum_{j=1}^{j=102} E_{P_{1j}} \cdot X_{TN_{ij}}}{\sum_{i=1}^{i=11} \sum_{j=1}^{j=102} E_{P_{1j}} \cdot X_{TN_{ij}}} \cdot 100$$

donde $E_{P_{1j}} = \sum_{l=1}^{l=8} E_{P_{1jl}}$ es la frecuencia del error consecuencia de la selección por parte de los protanopes del estímulo j como perteneciente a la categoría $i = 1$ (*rojo*) (conforme a los criterios establecidos previamente), y $X_{TN_{ij}} = \sum_{k=1}^{k=15} X_{TN_{ijk}}$ es la frecuencia de selección por parte de los tricrómatas normales del estímulo j como perteneciente a la categoría i (estas frecuencias se toman directamente de las matrices $\mathbf{E_P}$ y $\mathbf{X_{TN}}$).

- d. Las matrices individuales (de protanopes y deuteranopes) informan sobre las selecciones realizadas por cada individuo. Por ello, se aplicó el procedimiento descrito pero comparando cada una de las matrices individuales con la matriz grupal de tricrómatas normales (la única diferencia con respecto al caso anterior es que las matrices individuales sólo contienen ceros o unos, en lugar de la frecuencia de selección).
5. A partir de los pasos anteriores se determinaron diferentes matrices de confusión rectangulares de dimensiones 11 x 11 para resumir la existencia y naturaleza de los errores cometidos:
 - a. A nivel grupal. Se construyeron 4 matrices de confusión (una para cada grupo, P y D, y según los dos criterios seguidos para definir los aciertos). Dichas matrices suponen uno de los resultados más importantes de esta tesis, y se muestran en las Tablas 6.13.1-6.13.2 (criterio estricto) y AI.1.1-AI.1.2 (criterio laxo).
 - a. A nivel individual. Se construyeron 34 matrices de confusión (8 x 2 para P, y 9 x 2 para D, dos para cada observador siguiendo los criterios descritos), que no se muestran por razones de espacio. A partir de dichas matrices se ha podido establecer el número de observadores, dentro de cada grupo, que cometieron de hecho los errores establecidos a nivel grupal (Tablas 6.15.1.-6.15.2 y AI.2.1-AI2.2).

A continuación se muestran los resultados derivados de la aplicación del criterio laxo, de forma análoga a como se presentaron en el apartado de resultados de la tarea de mapa de colores los obtenidos tras la aplicación del criterio estricto. Concretamente:

- Las Tablas AI.1.1 (protanopes) y AI.1.2 (deuteranopes) muestran las matrices de confusión que resumen el porcentaje de aciertos y la distribución del porcentaje de errores para cada categoría. Esta misma información se representa gráficamente en la Figura AI.1.
- Las Tablas AI.2.1 (protanopes) y AI.2.2 (deuteranopes) muestran el número de observadores que acertaron y que cometieron los diferentes tipos de error establecidos a nivel grupal.
- La Tabla AI.3 destaca las asimetrías más destacables que aparecen en las Tablas AI.1.1- AI.1.2.
- La Tabla AI.4 muestra diferentes medidas de ejecución (porcentaje de aciertos, porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB, e índice de solapamiento con el grupo de TN) para el grupo de protanopes y el de deuteranopes, así como para cada individuo por separado.
- Por último, se muestran las matrices de confusión para los observadores protanopes que mostraron el mejor (Tabla AI.5.1) y el peor (AI.5.2) índice de aciertos, así como para los observadores deuteranopes que mostraron el mejor (Tabla AI.6.1) y el peor (AI.6.2) índice de aciertos.

Los resultados comentados en el apartado de resultados de la tarea de mapa de colores fueron independientes de la aplicación de los criterios laxo y estricto, a pesar de que aparentemente resulten tan dispares. Concretamente, los análisis comparativos entre protanopes y deuteranopes en lo referente a la frecuencia de aciertos, de errores, y el porcentaje de errores, reflejaron exactamente el mismo patrón de resultados. Lo mismo ocurrió con el análisis sobre la relación entre la frecuencia de uso y las tres variables indicadas anteriormente (consúltese el apartado correspondiente).

Como es lógico, emplear el criterio laxo para definir los aciertos incrementa notablemente la frecuencia de estos con respecto al uso del criterio estricto. A continuación se describen las diferencias más notables entre el uso del criterio laxo (Tablas AI.1.1-AI.1.2) y el uso del criterio estricto (Tablas 6.13.1-6.13.2):

1. En términos globales, del total de 830 estímulos seleccionados por los protanopes, se contabilizaron 535 aciertos y 295 errores empleando el criterio laxo para definir los aciertos. Empleando el criterio estricto, estos valores se transforman en 466 aciertos y 364 errores, lo que supone una reducción del 64,46% de aciertos al 56,14% al pasar de un criterio al otro. En el caso de los deuteranopes, el paso del criterio laxo al estricto hace que se pase de un 65,46% de aciertos a un 55,69%. Concretamente, del total de 993 estímulos seleccionados, 650 fueron aciertos según el criterio laxo, y 343 fueron errores, cifras que se convirtieron en 553 aciertos y 440 errores bajo el criterio estricto. A continuación se desglosan las consecuencias de forma más pormenorizada, atendiendo especialmente a aquellos casos en los que se dieron más diferencias entre el uso de ambos criterios.
2. El empleo del criterio estricto reduce el porcentaje de aciertos (diagonal principal de las matrices de confusión) en todas las CCB excepto en el caso de *naranja*. El cambio más dramático se produce en *blanco*, que pasa de un 96,15% de aciertos a un 67,31% en protanopes y del 100% a un 70,69% en deuteranopes. (El hecho de que no existan cambios para la categoría *naranja* deriva simplemente del hecho de que en todos los estímulos incluidos bajo esta categoría por los tricrómatas normales, *naranja* fue la moda de la distribución de respuestas, por lo que los criterios laxo y estricto son indistinguibles).
3. Al emplear el criterio estricto aumentan en consecuencia los porcentajes de error con el resto de categorías con las que ya existían errores empleando el criterio laxo (por ejemplo, *marrón* y *negro* pasa de un 1,72%, que ni siquiera se muestra en la Tabla AI.1.1, por ser un porcentaje inferior al 3%, a un 5,94% en protanopes, Tabla 6.13.1, y de un 8,23%, Tabla A.I.1.2, a un 12,68% en deuteranopes, Tabla 6.13.2).
4. Aparecen errores nuevos, en las transiciones naturales entre categorías, como por ejemplo (se dan los 5 valores más altos):
 - a. Para protanopes:

- i. *Blanco y rosa* (pasa de un 0% a un 22,88%)
 - ii. *Negro y azul* (pasa de un 0% a un 5,71%)
 - iii. *Morado y Rosa* (pasa de un 0% a un 5,51%)
 - iv. *Gris y marrón* (pasa de un 0% a un 4,41%)
 - v. *Azul y verde* (pasa de 0% a 3,88%)
- b. Para deuteranopes:
- i. *Blanco y rosa* (pasa de un 0% a un 26,30%)
 - ii. *Azul y verde* (pasa de 0% a 9,43%)
 - iii. *Negro y azul* (pasa de un 0% a un 7,13%)
 - iv. *Blanco y amarillo* (pasa de un 0% a un 3,01%)
 - v. *Morado y Rosa* (pasa de un 0% a un 2,83%)

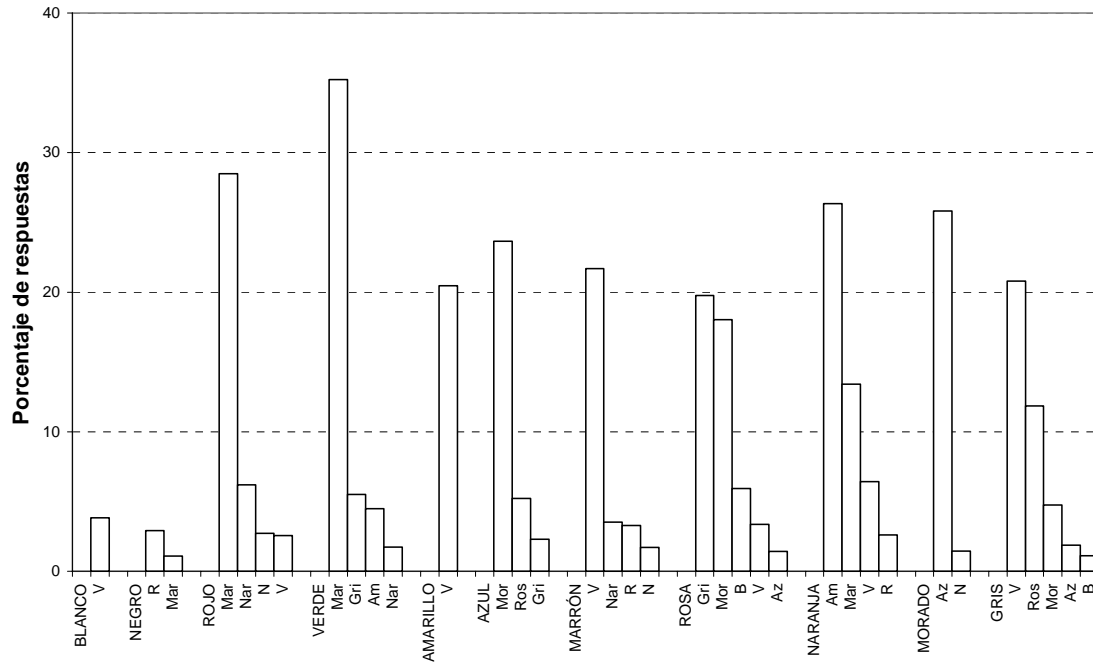
Tabla AI.1.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.13.1, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	96,15			3,85								0,00
N		95,24										4,77
R			60,00				28,48		6,21			5,31
V				52,00	4,49		35,23				5,52	2,76
Am				20,45	79,55							0,00
Az						68,33		5,21		23,65		2,80
Mar			3,29	21,68			69,47		3,52			2,03
Ros	5,94			3,36				50,40		18,02	19,76	2,52
Nar				6,42	26,35		13,41		51,22			2,61
Mor						25,82				72,73		1,45
Gri				20,78				11,84		4,75	59,65	2,98

Tabla AI.1.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el grupo de observadores protanopes en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.13.2, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		98,00										2,00
R			80,00				10,00		8,55			1,45
V		7,12		49,71			24,90				11,09	7,16
Am				15,31	82,05							2,64
Az						86,79				10,01		3,20
Mar		8,23	3,32	17,92	3,49		60,56					6,49
Ros				3,88				49,65		19,94	23,35	3,18
Nar					10,65				84,91			4,45
Mor		9,21	4,20	5,36		7,11			5,94	66,67		1,51
Gri		3,02		17,01				9,78		11,62	53,38	5,19

A



B

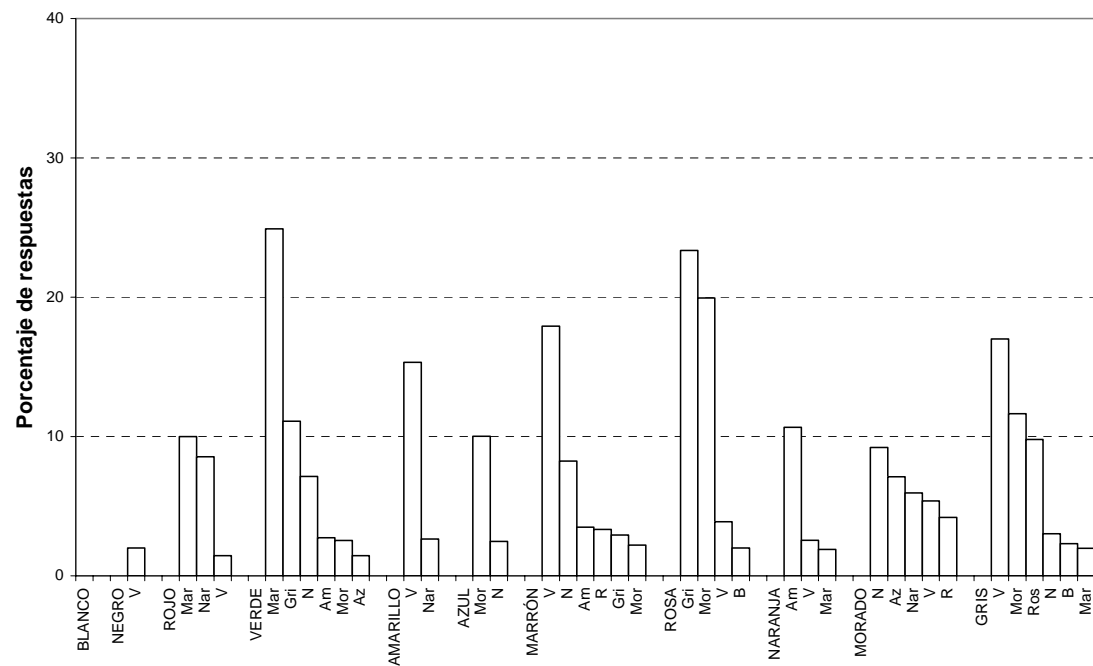


Figura AI.1. Distribución del porcentaje de errores cometidos por protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores en función de las diferentes categorías. A: protanopes. B: deuteranopes. Se representa la misma información que en las Figuras 6.6A y 6.6B, pero empleando los datos de las Tablas AI.1.1. y AI.1.2.

Tabla AI.2.1. Número de observadores protanopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores según el criterio laxo para definir los aciertos. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.15.1, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	8			2							
N		8	1				1	1		1	
R		2	8	1			5		1		
V		2		8	3	1	8	2	2	1	4
Am				6	8						
Az	1	2	1			8		4		6	3
Mar		2	3	7			8		2		1
Ros	5		4	3	1	4		8		7	7
Nar			1	6	7		7		8		
Mor		6				7				7	
Gri	4			8		8		6		7	8

Tabla AI.2.2. Número de observadores deuteranopes que identificaron correctamente algunas muestras (diagonal) y que mostraron errores en la tarea de mapa de colores según el criterio laxo para definir los aciertos. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.15.2, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri
B	9										
N		9		1							
R			9	1			6		2		
V		6	1	9	3	2	9	2		4	7
Am				5	9				1		
Az		1				9				3	1
Mar		5	3	8	3	1	9	3	1	3	3
Ros	7		1	3		4	1	9		6	8
Nar				2	3		1		9		
Mor		3	1	3		5	2		1	8	2
Gri	1	2	2	7		4	1	8		7	9

Tabla AI.3. Asimetrías más destacables detectadas en las Tablas AI1.1-AI.1.2 y AI2.1-AI.2.2. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.17, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos. Fuera del paréntesis se muestra el porcentaje correspondiente (a partir de las Tablas AI.1.1- AI.1.2), y entre paréntesis, el número de observadores que cometió el error (a partir de las Tablas AI.2.1- AI.2.2).

	Protanopes		Deuteranopes	
	Buscando la 1ª categoría	Buscando la 2ª categoría	Buscando la 1ª categoría	Buscando la 2ª categoría
B-Ros	0,00 (0)	5,94 (5)	0,00 (0)	2,00 (7)
N-V	0,00 (0)	0,16 (2)	2,00 (1)	7,12 (6)
N-Mar	1,10 (1)	1,72 (2)	0,00 (0)	8,23 (5)
N-Mor	0,37 (1)	1,45 (6)	0,00 (0)	9,21 (3)
R-Mar	28,48 (5)	3,29 (3)	10,00 (6)	3,32 (3)
R-Nar	6,21 (1)	2,61 (1)	8,55 (2)	0,00 (0)
V-Am	4,49 (3)	20,45 (6)	2,72 (3)	15,31 (5)
V-Mar	35,23 (8)	21,68 (7)	24,90 (9)	17,92 (8)
V-Gri	5,52 (4)	20,78 (8)	11,09 (7)	17,01 (7)
Am-Nar	0,00 (0)	26,35 (7)	2,64 (1)	10,65 (3)
Mar_Nar	3,52 (2)	13,41 (7)	0,28 (1)	1,89 (3)
Ros_Mor	18,02 (7)	0,00 (0)	19,94 (6)	0,00 (0)
Ros_Gri	19,76 (7)	11,84 (6)	23,35 (8)	9,78 (8)
Nar-Mor	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	5,94 (1)
Mor-Gri	0,00 (0)	4,75 (7)	0,93 (2)	11,62 (7)

Tabla AI.4. Diferentes medidas de la ejecución de protanopes y deuteranopes en la tarea de mapa de colores, siguiendo el criterio laxo para definir los aciertos. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.18, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos. P = protanopes, D = Deuteranopes.

	Porcentaje de aciertos	Porcentaje medio de aciertos a través de las 11 CCB	Índice de solapamiento con TN
P	64,46	68,61	61,23
P1: LEL	57,06	62,26	57,86
P2: JPGA	72,22	76,56	69,23
P3: PAL	66,67	71,71	61,41
P4: RN	62,26	72,95	60,55
P5: DLL	61,05	72,64	54,16
P6: JMI	75,00	80,63	69,17
P7: JJMC	55,38	57,40	49,98
P8: JGL	67,44	69,90	60,55
D	65,46	73,79	63,24
D1: CTM	60,38	73,89	53,05
D2: ASC	71,43	80,95	67,66
D3: JSC	58,21	71,65	58,08
D4: AEM	76,61	83,58	76,13
D5: EGS	73,61	78,86	71,30
D6: FJR	64,12	77,43	61,31
D7: JP	57,79	68,30	58,04
D8: JT	68,82	75,68	63,17
D9: DSC	64,86	76,04	58,75

Tabla AI.5.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JMI (P6) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.20.1, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		100										0,00
R			100									0,00
V				47,06			52,94					0,00
Am					100							0,00
Az						66,67				33,33		0,00
Mar				27,27			63,64		9,09			0,00
Ros								75,00		17,05	6,82	1,14
Nar							14,29		85,71			0,00
Mor						11,11				88,89		0,00
Gri				26,67						10,48	60,00	2,86

Tabla AI.5.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador protanope JJMC (P7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.20.2, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		100										0,00
R			33,33				66,67					0,00
V				75,00			6,67		18,33			0,00
Am				33,33	66,67							0,00
Az						80,00		18,75				1,25
Mar				50,00			50,00					0,00
Ros								50,00		38,81	9,70	1,50
Nar				6,15	39,23		14,62		40,00			0,00
Mor						97,62				0,00		2,38
Gri				25,82				32,28			36,36	5,53

Tabla AI.6.1. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope AEM (D4) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.21.1, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		100										0,00
R			66,67						30,37			2,96
V				61,54			7,60				25,94	4,92
Am					100							0,00
Az						100						0,00
Mar		8,65			3,85		75,00				6,25	6,24
Ros								60,00		17,58	21,21	1,21
Nar				11,11	11,11				77,78			0,00
Mor		10,00								87,50		2,50
Gri								9,09			90,91	0,00

Tabla AI.6.2. Porcentaje de aciertos y distribución del porcentaje de errores cometidos por el observador deuteranope JD (D7) en la tarea de mapa de colores para cada TCB. Se muestra la misma información que en la Tabla 6.21.2, pero a partir del criterio laxo en lugar del criterio estricto para definir los aciertos.

	B	N	R	V	Am	Az	Mar	Ros	Nar	Mor	Gri	Otras
B	100											0,00
N		100										0,00
R			60,00				19,66		20,34			0,00
V		22,19		41,67		10,02				13,60	10,38	2,15
Am				10,00	80,00				10,00			0,00
Az						100						0,00
Mar		11,95		19,47		5,12	58,33			3,42		1,71
Ros								57,14			40,60	2,26
Nar				3,02	36,98				60,00			0,00
Mor			19,78						28,02	50,00		2,20
Gri		8,29		17,91			8,02	10,96		10,16	44,12	0,54

ANEXO II: PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL ÍNDICE DE SOLAPAMIENTO EN LA TAREA DE MAPA DE COLORES

Para calcular dicho índice de solapamiento se llevaron a cabo los siguientes pasos:

1. Partiendo de las matrices grupales \mathbf{X}_{TN} , \mathbf{X}_P y \mathbf{X}_D , que como ya se ha indicado establecen la frecuencia de selección de los diferentes estímulos en función de las 11 CCB, se calcularon las proporciones de respuesta de cada CCB para cada columna (muestra). La razón por la cual es necesario este cambio es simplemente porque el nº de observadores en cada grupo es diferente. Así se obtienen las matrices \mathbf{P}_{TN} , \mathbf{P}_P y \mathbf{P}_D (cuyas columnas suman siempre 1).
2. Para cada matriz grupal, \mathbf{X}_{TN} , \mathbf{X}_P y \mathbf{X}_D , se calculó el peso de cada una de las muestras, a partir de número total de respuestas que hubiera recibido la muestra en cuestión. El peso de la muestra j ($j = 1, 2, \dots, 102$) para el grupo $G =$ (*tricrómatas normales, protanope, deuteranope*), PM_{G_j} , será

$$PM_{G_j} = \frac{\sum_{i=1}^{i=11} X_{G_{ji}}}{n_G}$$

donde $X_{G_{ji}}$ es la frecuencia con la que el grupo G seleccionó la muestra j como perteneciente a la categoría i , y n_G es el número de observadores que conforman el grupo correspondiente ($n_{TN} = 15$, $n_P = 8$; $n_D = 9$) (en los casos infrecuentes en los que el numerador de la expresión anterior fuese mayor que el denominador, el peso asignado se fijó en 1). La razón por la cual se realizó este cálculo deriva del hecho de que las matrices \mathbf{P}_{TN} , \mathbf{P}_P y \mathbf{P}_D no contienen información en términos absolutos (frecuencia). Mediante el cálculo del peso de las muestras se corrige esta pérdida, de forma que cada muestra gana importancia en función del nº de respuestas que ha recibido. De otra manera podría suceder lo siguiente: una muestra que hubiera recibido 15 respuestas de los tricrómatas normales y 8 respuestas de los protanopes usando la misma CCB, mostraría el mismo grado de solapamiento que otra muestra que hubiera recibido 15 respuestas de los tricrómatas normales y únicamente 2 respuestas de los protanopes usando la misma CCB (no habiendo sido seleccionada por ningún otro protanope bajo ninguna otra CCB). Mediante la corrección del peso de la muestra, nos

aseguramos de que en el primer caso el solapamiento será del 100%, pero sólo del 25% en el segundo. Así se obtiene un vector de pesos de dimensiones 1 x 102 por cada grupo.

3. Se calcula el peso final de cada muestra, PM_j , multiplicando el peso de que dicha muestra tenga en cada uno de los grupos para los cuales se esté computando el índice de solapamiento. La suma de estos pesos finales se empleará para escalar el solapamiento entre grupos.
4. Para calcular el solapamiento entre los mapas de color de dos grupos cualesquiera, se creó una nueva matriz de solapamiento. Por ejemplo, la matriz $S_{(TN,P)}$ resume el solapamiento de los mapas de color de tricrómatas normales y protanopes. Para construir esta nueva matriz, el cálculo básico es tomar para cada una de sus celdillas el valor mínimo de las dos celdillas correspondientes de las matrices de proporciones P_{TN} y P_P . Nótese que este cálculo equivale a la intersección difusa bajo el esquema de los conjuntos borrosos (Kay y McDaniel, 1978): a la intersección de las distribuciones relativas de respuesta ante un estímulo determinado, se le asignó el mínimo de los dos valores correspondientes, de manera que necesariamente el valor máximo del solapamiento para un estímulo fuese igual a 1. Finalmente, este valor se pondera por el peso final de la muestra correspondiente, de manera que cada celdilla $S_{(TN,P)_{ij}}$ de la nueva matriz de solapamiento contiene el valor $\min(P_{P_{ij}}, P_{TN_{ij}}) \cdot PM_j$.
5. El solapamiento entre grupos se obtiene sumando las celdas de la nueva matriz, y escalando en función de la suma de todos los pesos finales. Por ejemplo, el solapamiento entre los mapas de color de tricrómatas normales y protanopes se calcula

$$S_{(TN,P)} = \frac{\sum_{i=1}^{i=11} \sum_{j=1}^{j=102} S_{(TN,P)_{ij}} \cdot PM_j}{\sum_{j=1}^{j=102} PM_j} \cdot 100 = \frac{\sum_{i=1}^{i=11} \sum_{j=1}^{j=102} \min(P_{P_{ij}}, P_{TN_{ij}}) \cdot PM_j}{\sum_{j=1}^{j=102} PM_j} \cdot 100$$

6. El procedimiento descrito se aplicó también a los mapas de color individuales de protanopes y deuteranopes, comparándolos con el mapa de color grupal de los tricrómatas normales (la única diferencia con respecto al caso anterior es que las matrices individuales contienen ceros o unos, en lugar de la frecuencia de selección).

La interpretación de la magnitud del índice de solapamiento así calculado es muy sencilla:

- Para un estímulo concreto, el rango de valores del índice de solapamiento va de 0 a 1. Un solapamiento igual a 1 significa necesariamente que la distribución de las respuestas de los dos grupos ante el estímulo (en términos relativos) ha sido idéntica, y además que la muestra fue seleccionada por todos los observadores de los dos grupos (el peso final era igual a 1). Un solapamiento igual a 0 significa que, para ese estímulo, ninguna categoría se ha empleado conjuntamente por los dos grupos.
- A nivel grupal, el índice de solapamiento puede tomar valores entre 0 y 100. Por ejemplo, el solapamiento del mapa de color de un grupo consigo mismo es exactamente 100. Un solapamiento igual a 0 indicaría que no hubo ningún estímulo seleccionado bajo la misma categoría por los dos grupos.

A modo de ejemplo, las Tablas AII.1 y AII.2 muestran, para protanopes y deuteranopes, respectivamente, cómo puede derivarse el solapamiento entre las distribuciones de respuesta ante diferentes estímulos a nivel grupal. En ambas tablas se muestran estímulos con diferente grado de solapamiento. Por ejemplo, la Tabla AII.1 muestra que:

- El estímulo S 0580-Y tiene un solapamiento de 1 entre los grupos de TN y P. Efectivamente, los 15 TN y los 8 P lo incluyeron exclusivamente dentro de la categoría *amarillo*.
- En el otro extremo, el estímulo S 2060-Y mostró un solapamiento igual a 0: en ningún caso se incluyó dentro de la misma categoría, puesto que mientras que 9 TN lo incluyeron como ejemplar de *amarillo* y 5 como ejemplar de *marrón*, los protanopes no lo incluyeron bajo ninguna de estas categorías, sino que lo hicieron bajo las de *naranja* (6) y *verde* (2). Entre estos dos valores extremos del índice de solapamiento, encontramos valores intermedios.
- Por ejemplo, el estímulo S 2050-G30Y mostró un índice de solapamiento igual a 0,75. Este valor se deriva de que fue incluido como ejemplar de *verde* por los 15 TN, pero sólo por 6 de los 8 P, seleccionándolo los dos restantes como *marrón*.

- El estímulo S 5030-R50B tiene un índice de solapamiento igual a 0,50, puesto que mientras que la totalidad de TN lo incluyó dentro de *morado*, sólo lo hicieron así la mitad de los protanopes.
- Por último, el estímulo S 4020-R90B fue incluido como ejemplar de *gris* por 4 TN y como ejemplar de *azul* por otros 2, no siendo seleccionado por el resto de TN (9). Por su parte, 4 P lo seleccionaron como *gris*, 1 como *azul*, otro como *rosa* y otro como *verde*. Evidentemente el solapamiento se debe al uso conjunto de las categorías *gris* y *azul*. La ponderación de $5/8 = 0,625$ por el peso final de la muestra, que a diferencia de los estímulos anteriores no es igual a 1 sino igual a $6/15 * 8/8 = 0,4$, da como resultado un índice de solapamiento igual a 0,25. Es decir, el papel del peso final de las muestras es, como se indicó anteriormente, dar más importancia a aquellas muestras que recibieron mayor número de respuestas.

De forma análoga, la Tabla AII.2 muestra el grado de solapamiento entre los grupos de tricrómatas normales y deuteranopes para diferentes estímulos:

- El estímulo S 2060-R90B, seleccionado por los 15 TN y los 9 D exclusivamente como *azul*, tiene un solapamiento de 1.
- En el otro extremo, el estímulo S 0530-G50Y mostró un solapamiento igual a 0: mientras que los 15 TN lo seleccionaron como ejemplar de *verde*, ningún D lo hizo (6 lo seleccionaron como *amarillo*, 1 como *marrón* y otro como *naranja*)
- El estímulo S 3060-G10Y fue seleccionado por los 15 TN como verde, y también por los 9 D. Esto podría llevar a pensar erróneamente que su solapamiento sería igual a 1. Sin embargo, 3 de los 9 D también lo incluyeron como ejemplar de *marrón*. Este dato debe reducir el índice de solapamiento, y lo hace de la siguiente manera: puesto que el número total de respuestas ante el estímulo por parte de los deuteranopes es 12 (y no 9), la proporción de respuestas de verde es igual a $9/12 = 0,75$, y no igual a $9/9 = 1$. Por ello, el índice de solapamiento de este estímulo es igual a 0,75.
- El índice de solapamiento del estímulo S 4040-R30B es igual a 0,50. Efectivamente, fue seleccionado como *morado* por los 15 TN, pero sólo 5 de las 10 respuestas de los deuteranopes coincidieron con este patrón.

- Por último, el estímulo S 3030-R50B mostró un solapamiento igual a 0,25, derivado de que mientras que todos los TN lo seleccionaron como morado, sólo el 25% de respuestas de los deuteranopes (3 del total de 12) coincidieron.

Es muy importante recalcar aquí que en el cálculo del índice de solapamiento la distribución de los errores no influye en absoluto, por lo que dicho índice no es informativo sobre la naturaleza de los mismos. Una vez explicado y ejemplificado el procedimiento para calcular el índice de solapamiento, puede consultarse el solapamiento existente entre los mapas de color establecidos a nivel grupal en la Tabla 6.18. Como puede verse, el índice de solapamiento fue siempre mayor al 50%. Concretamente, fue igual a 61,23% entre los mapas de color de protanopes y tricrómatas normales, 63,24% entre los de deuteranopes y tricrómatas normales, y algo mayor, 72,80%, entre los dos grupos de dicrómatas.

Una estrategia habitual que se sigue en la literatura especializada para establecer el parecido entre estímulos (o entre matrices que resumen la respuesta de diferentes observadores ante varios estímulos), es recurrir al cálculo del coeficiente de correlación de Pearson (consúltese por ejemplo, Paramei, Bimler y Cavonius, 1998). En esta tesis se ha preferido emplear con cautela esta estrategia, por la sencilla razón de que el vector que resume las respuestas dadas ante cada estímulo tiene 11 dimensiones (las 11 CCB), lo que necesariamente causa una inflación en el cómputo del coeficiente de correlación, puesto que hay muchos casos con los valores (0, 0). La Figura AII.1 representa la relación entre estas dos medidas del parecido entre las respuestas dadas ante los diferentes estímulos por parte de tricrómatas normales y protanopes. Concretamente se representa el índice de solapamiento de los estímulos, calculado tal y como se ha descrito, en función del coeficiente de correlación de Pearson correspondiente, calculado también para cada estímulo a partir de los mapas de color grupales de tricrómatas normales y protanopes. Como puede verse, hay una fuerte asociación lineal entre ambas medidas ($R^2 = 0,9272$), pero hay una clara tendencia a que el índice de solapamiento tome valores menores a los que toma el coeficiente de correlación de Pearson (la pendiente es claramente inferior a 1, concretamente 0,7773).

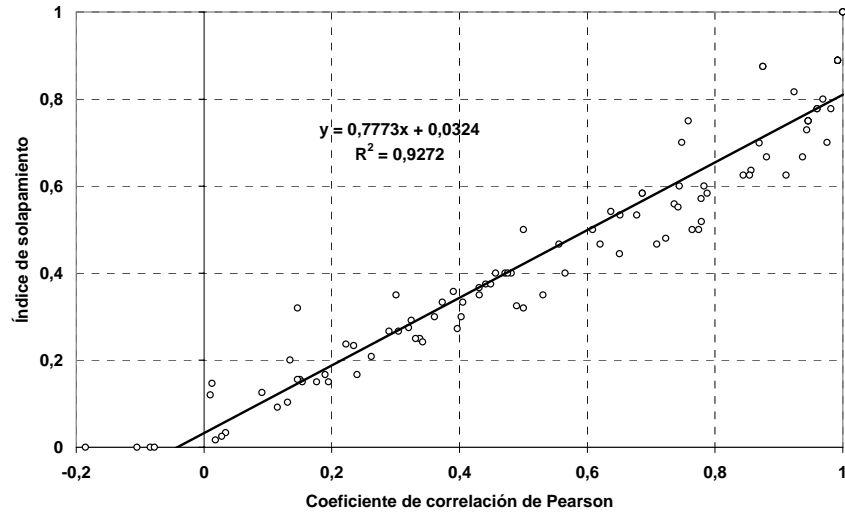


Figura AII.1. Relación entre el índice de solapamiento y el coeficiente de correlación de Pearson calculados a partir de los mapas de color grupales de tricrómatas normales y protanopes. Dentro del gráfico aparece la ecuación de la recta que mejor se ajusta a los datos según el procedimiento de mínimos cuadrados.

Tabla AII.1. Estímulos con diferente índice de solapamiento entre los mapas de color grupales de tricrómatas normales y protanopes. TN = tricrómatas normales, P = protanopes, p = proporción de respuestas de la categoría correspondiente. En negrita se resaltan las proporciones de respuesta implicadas en el cálculo del índice de solapamiento (recuérdese que en cada caso se toma el mínimo de las dos proporciones correspondientes), así como el único caso de los que se presentan en el que el peso de la muestra fue inferior a 1.

Estímulo	Índice de solapamiento	Distribución de respuestas (TN) [f/total] (p)			Distribución de respuestas (P) [f/total] (p)		
S 0580-Y	1	Am	[15/15]	(1)	Am	[8/8]	(1)
S 2050-G30Y	0,75	V	[15/15]	(1)	V Mar	[6/8] [2/8]	(0,75) (0,25)
S 5030-R50B	0,5	Mor	[15/15]	(1)	Mor Ros Az	[4/8] [3/8] [1/8]	(0,50) (0,375) (0,125)
S 4020-R90B	0,25	Gri Az Peso = 6/15 =	[4/6] [2/6] 0,4	(0,66) (0,33)	Gri Ros V Az	[4/8] [2/8] [1/8] [1/8]	(0,50) (0,25) (0,125) (0,125)
S 2060-Y	0	Am Mar	[9/15] [6/15]	(0,64) (0,36)	Nar V	[6/8] [3/8]	(0,33) (0,66)

Tabla AII.2. Estímulos con diferente índice de solapamiento entre los mapas de color grupales de tricrómatas normales y deuteranopes. TN = tricrómatas normales, D = deuteranopes, p = proporción de respuestas de la categoría correspondiente. En negrita se resaltan las proporciones de respuesta implicadas en el cálculo del índice de solapamiento.

Estímulo	Índice de solapamiento	Distribución de respuestas (TN) [f/total] (p)			Distribución de respuestas (D) [f/total] (p)		
S 2060-R90B	1	Az	[15/15]	(1)	Az	[9/9]	(1)
S 3060-G10Y	0,75	V	[15/15]	(1)	V Mar	[9/12] [3/12]	(0,75) (0,25)
S 4040-R30B	0,5	Mor R	[15/15] [1/15]	(0,94) (0,06)	Mor Gri V Mar Ros	[5/10] [2/10] [1/10] [1/10] [1/10]	(0,5) (0,2) (0,1) (0,1) (0,1)
S 3030-R50B	0,25	Mor	[15]	(1)	Ros Mor Gri Az	[6/12] [3/12] [2/12] [1/12]	(0,50) (0,25) (0,17) (0,08)
S 0530-G50Y	0	V	[15/15]	(1)	Am Mar Nar	[5/7] [1/7] [1/7]	(0,71) (0,14) (0,14)